

**Cambios en los ambientes de deposición de las unidades neógenas expuestas
en el sector de Piojó, Atlántico, Colombia.**

Carlos Andrés Ortiz Barrios



Universidad del Norte

Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla

2020

**Cambios en los ambientes de deposición de las unidades neógenas expuestas
en el sector de Piojó, Atlántico, Colombia.**

Carlos Andrés Ortiz Barrios

Trabajo de Grado para optar al título de geólogo

Director

Ph.D. Aldo Fernando Rincón Burbano



Universidad del Norte

Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla

2020

A mi amada familia,

*cuyos miembros me apoyaron incondicionalmente en todo momento, y me
inspiraron para poder terminar esta hermosa etapa de mi vida.*

Agradecimientos

A Don Rafael de Marchena-Huyke (Q.E.P.D) y a la familia Marchena-Huyke por haber confiado en mí durante todo mi período académico y haberme brindado todo lo necesario para cumplir mi sueño de ser profesional.

A mi director Aldo Fernando Rincón Burbano por hacer parte fundamental de mi desarrollo como profesional, y acompañarme durante la realización de este trabajo con aportes valiosos.

A la planta de profesores del departamento de Física y Geociencias por haber creído constantemente en el proyecto de Geología – Uninorte.

A los profesores Camilo Montes y Felipe Lamus, por sus enseñanzas y consejos a lo largo de la carrera y su aporte constante en este proyecto, al profesor Javier Idárraga por sus comentarios, los cuales aportaron a la mejora de este trabajo y a los profesores Juan Camilo Restrepo, Carolina Martínez y Carlos Pinilla por su dedicación y constante apoyo durante toda la carrera.

A mis amigos y colegas Daniel Fernández y Jorge Galeano por brindarme su confianza y haber trabajado codo a codo junto conmigo en este proyecto, a Juan David Atencio y Daniel Alejandro Raad por su constante colaboración en el trabajo de campo, y a todos mis amigos con los que compartí estos 4 años y medio por su motivación y apoyo.

A la reserva natural Los Charcones de Piojó y su equipo de trabajo por permitirme trabajar en sus predios, y a la Sra. Marina y el Sr. Víctor del corregimiento de Santa Verónica por brindarme hospedaje durante todo el tiempo de trabajo en el corregimiento.

Resumen

Entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano, en el norte del departamento del Atlántico se depositaron unidades litoestratigráficas que registraron la evolución del paleo-delta del río Magdalena. Trabajos en el sector han propuesto múltiples migraciones del paleo-delta, y recientemente se han propuesto cambios en la dinámica sedimentaria asociada a fenómenos paleo-climáticos de escala regional. Con el fin de localizar los cambios en los ambientes de depositación relacionados a la evolución del paleo-delta del río Magdalena, en este trabajo se realizó un análisis de litofacies para tres secciones estratigráficas depositadas entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano en el sector de Piojó, Atlántico. Para esto, se midieron 448 metros estratigráficos describiendo características litológicas con significancia genética, se identificaron 12 litofacies, se agruparon en 5 asociaciones de facies, y se identificaron los patrones estratigráficos en cada segmento. A partir del análisis de las litofacies se interpretaron ambientes deltaicos progradantes en el Mioceno tardío, y ambientes marino someros fluctuantes en el Plioceno temprano. El contraste entre los patrones estratigráficos identificados previamente al este de la región, con los encontrados en este trabajo indica que no existe evidencia estratigráfica de patrones retrogradacionales producto de eventos de escala regional en el sector norte del departamento del Atlántico.

Palabras clave: paleo-delta, Plioceno temprano, litofacies, patrones estratigráficos, ambientes de depositación.

Abstract

The evolution of the Magdalena river paleo-delta is recorded in the upper Miocene-lower Pliocene lithostratigraphic units deposited in the northern sector of the Atlántico department. Previous works in the region have proposed late Neogene migration of multiple paleo-deltaic lobes, and recently the dynamics of the delta has been tentatively linked to regional paleo-climatic events. To identify spatio-temporal changes in depositional environments associated to the Magdalena river paleo-delta, I analyzed the lithofacies in three stratigraphic sections deposited in late Miocene-early Pliocene near Piojó, Atlántico. 448 meters were described and measured using mesoscopic lithological characteristics with genetic significance allowing the definition of 11 lithofacies grouped into 5 facies associations, and the identification of stacking pattern at each lithostratigraphic segment. As consequence, progradational deltaic environments were interpreted in the late Miocene while interbedding shallow marine environments were interpreted for the early Pliocene. The contrast between the stacking pattern previously identified in the Arroyo de Piedras section, with those found in the Piojó area, indicate lack of evidence for allocyclic processes related to the retrogradational stacking pattern preserved in the lithostratigraphic sections.

Keywords: paleo-delta, early Pliocene, lithofacies, stacking pattern, depositional environments.

Contenido

1 Introducción.....	1
2 Planteamiento del problema.....	3
3 Objetivo general	4
4 Objetivos específicos	4
5 Marco geológico.....	5
5.1 Cretácico Tardío y Paleógeno	5
5.2 Neógeno y Cuaternario.....	6
5.3 Estratigrafía del sector de Piojó	7
6 Zona de estudio.....	8
7 Metodología.....	9
7.1 Recopilación bibliográfica	9
7.2 Trabajo de campo	10
7.3 Construcción de las columnas estratigráficas.....	10
7.4 Análisis de litofacies	10
8 Resultados	11
8.1 Asociación de facies.....	11
8.1.1 Depósitos de prodelta (AF1)	11
8.1.2 Depósitos de prodelta proximal a frente deltaico (AF2)	14
8.1.3 Depósitos de frente deltaico (AF3)	15
8.1.4 Depósitos de frente de playa superior (AF4)	17
8.1.5 Depósitos de plataforma – frente de playa inferior (AF5)	18
8.2 Secciones estratigráficas	19
8.2.1 Sección Playa Someca (PS).....	20
8.2.2 Sección Cerro del Furú (CF)	21
8.2.3 Sección Arroyo Piojó (AP)	21
9 Discusión	24
9.1 Posición estratigráfica y edad.....	24
9.2 Ambientes de depositación.....	26
9.3 Patrones estratigráficos regionales y cambios en los ambientes de depositación	27
10 Conclusiones	29
11 Referencias	30

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de unidades cronoestratigráficas del CPSJ	6
Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio	9
Figura 3. Depósitos de prodelta (AF1). a. Lodolitas laminadas de la litofacies Lm, se reconoce el icnogénero <i>Ophiomorpha</i> (Oph). b. Lodolitas gravosas y conglomerados matriz-soportados de la litofacies Dgm. c. Bloques angulares de lodolitas y areniscas interestratificadas de la litofacies Asb.	14
Figura 4. a. Areniscas laminadas y lodolitas de la litofacies Im. b. Detritos vegetales en las areniscas de grano muy fino de la litofacies Im.	15
Figura 5. Depósitos de frente deltaico. a. Heterolitas de la litofacies H, se reconoce el icnogénero <i>Skolithos</i> (Sk). b. Areniscas macizas de la litofacies Ms, amalgamadas con areniscas con laminación paralela en patrones grano-decrecientes debido a depositación por flujos menguantes. c. Cuerpos de areniscas lentiformes con laminación cruzada planar cortando secuencias heterolíticas, se reconoce el icnogénero Sk. d. Grietas de sinéresis.	16
Figura 6. Depósitos de frente de playa superior y playa. a. Areniscas estratificadas de la litofacies Ps. b. Sucesión de facies de la AF4, se observa una capa fina de areniscas lodosas oxidadas con estratificación convoluta, areniscas con laminación <i>ripple simétrica</i> y areniscas bioturbadas, se reconoce el icnogénero <i>Skolithos</i> (Sk).	18
Figura 7. Depósitos de plataforma – frente de playa inferior. a. Lodolitas Lm y coquinas de la litofacies C. b. Detalle del tope de las coquinas de la litofacies C, se observan bioclastos desarticulados centimétricos y se reconoce el icnogénero <i>Thalassinoides</i> (Thl). c. Detalle de las lodolitas laminadas, intercaladas con areniscas de la litofacies Im, se observa una concreción alargada. d. Limolitas con estratificación <i>hummocky</i> (Hcs), las truncaciones simétricas de tercer orden indican que es un <i>hummock</i> isotrópico, tiene aproximadamente 7 metros de longitud de onda.	19
Figura 8. Columna estratigráfica de la sección Playa Someca. a. Limolitas con estratificación <i>hummocky</i> isotrópica. b. Detalle de la litofacies H que está justo por encima de las limolitas con estratificación <i>hummocky</i> , se observan laminaciones lenticulares y <i>flaser</i> , y se reconoce el icnogénero <i>Skolithos</i> (Sk). c. Afloramiento de acantilado costero donde se observa el predominio de la litofacies Lm en la sección, esta se intercala hacia la mitad de la columna con coquinas y calciruditas rojizas de la litofacies C.	21
Figura 9. Columna estratigráfica de la sección Cerro del Furú. a. contacto neto entre la AF3 y AF4, se observa el último intervalo lodoso de la AF3 suprayacido por areniscas con laminación plano-paralela. b. Vista general de la sección CF, se observa cómo van apareciendo niveles más arenosos hacia el tope (líneas punteadas finas) y que en general la sección presenta un patrón grano creciente.	22
Figura 10. Columna estratigráfica de la sección Arroyo Piojó. a. Secuencia grano y estrato creciente entre las litofacies H y Ps. b. Detalle de las heterolitas con laminación <i>flaser</i> . c. Secuencia grano creciente que limita al tope con coquinas y areniscas calcáreas (línea blanca punteada), este contacto es interpretado como una superficie transgresiva de erosión marina. d. e. Moluscos articulados en posición de vida que se encuentran en las lodolitas laminadas de la litofacies Lm. f.	

Secuencia de lodolitas laminadas que se agrupan en se intercalan con areniscas de grano muy fino	23
Figura 11. Ensamblajes de foraminíferos planctónicos reportados en las secciones estratigráficas previamente estudiadas en el área de interés (Bordine, 1974; Molinares et al., 2012) ubicados en las zonas planctónicas de Bolli y Saunders (1985)	25

Lista de tablas

Tabla 1. Litofacies definidas.....	12
---	----

1 Introducción

La secuencia sedimentaria neógena expuesta en el sector nororiental del cinturón plegado de San Jacinto (CPSJ) está compuesta por una sucesión espesa, regresiva y principalmente siliciclástica intercalada con secuencias biogénicas discontinuas (Aguilera, 2011; Guzmán et al., 2004). En el área de Piojó varias unidades litoestratigráficas han sido propuestas (Anderson, 1926; Anderson, 1929; Bueno, 1970; Bürgl et al., 1955; Redmond, 1953). Sin embargo, la mayoría de estas se encuentran en desuso, o su aplicación lleva a contradicciones estratigráficas (De Porta, 1974). Guzmán et al (2004) revisaron la nomenclatura estratigráfica del CPSJ y redefinieron las unidades expuestas en el sector de Piojó, utilizando los nombres de Hibácharo y Tubará para las unidades del Mioceno medio al Plioceno superior. En estas formaciones varios horizontes fosilíferos han sido descritos, especialmente ensambles de crustáceos y moluscos, útiles para vincular las sucesiones faunísticas de la fauna marina de la provincia del Caribe con el cierre del istmo de Panamá (Anderson, 1926; Anderson, 1929; Bermúdez et al., 2017; Bold, 1966; De Porta, 2003; Molinares, 2007; O’Dea et al., 2016). Además, el reciente interés en la exploración de hidrocarburos, tanto en el valle inferior del Magdalena como en los cinturones de Sinú-San Jacinto (Aguilera, 2011), y el potencial de reservorio para unidades acuíferas (Huguett, 1988), justifican el reciente estudio de las unidades geológicas expuestas en el sector de Piojó.

En el sector de Piojó, al menos tres ciclos sedimentarios han sido identificados (Bürgl et al., 1955) y están conformados por una sucesión regresiva, en la cual facies de plataforma infrayacen facies costeras y deltaicas, asociadas al paleo-delta del río Magdalena (Bordine, 1974; Vernet et al., 1992). Molinares et al (2012) identificaron la parte superior de esta secuencia más hacia el este, infrayaciendo sucesiones costeras sin relación genética, lo cual implica una superficie transgresiva que registra una migración del paleo-delta. La ausencia de material siliciclástico en las coquinas y

areniscas calcáreas (Coquinas de Juaruco en Galeano, 2020) que suprayacen discordante a la Formación Tubará, soporta esta hipótesis. Además, la presencia esporádica de las calizas coralinas pleistocénicas de la Formación La Popa, entre Barranquilla y Cartagena, restringen la edad del paleo-delta y su ubicación, debido a que no es viable el desarrollo de arrecifes coralinos en ambientes de alta turbidez y de fondos con sedimentos no consolidados (Bordine, 1974). Análisis estratigráficos, sísmica offshore y la presencia de lóbulos deltaicos abandonados en la plataforma continental, sugieren transporte de sedimentos del paleo-delta en sentido SE-NW en la zona de Tubará, una migración subsecuente hacia el occidente, cerca de Galerazamba para finalmente desembocar en Boca Vieja, muy cerca a la desembocadura actual (Bordine, 1974; Carvajal, 1990; Kolla et al., 1984; Molinares et al., 2012).

Los continuos cambios de posición del paleo-delta desde el Mioceno tardío hasta el Plioceno pueden estar controlados por procesos autocíclicos, como cambios locales en el nivel de base (avulsiones). Sin embargo, durante este intervalo de tiempo ocurrieron varios eventos geológicos, paleo-oceanográficos y climáticos de escala regional (procesos alocíclicos), que afectaron los Andes del norte, tales como la exhumación y levantamiento de la Cordillera Oriental (Anderson et al., 2016; Siravo et al., 2020), cierre del istmo de Panamá (León et al., 2018; Montes et al., 2015), condiciones climáticas tipo El Niño permanentes (Pérez-Ángel y Molnar, 2017; Wara et al., 2005), y cambios eustáticos del nivel del mar (Eberli, 2000). La sincronía entre estos eventos y el desarrollo del paleo-delta del río Magdalena, lleva a la pregunta de si existe influencia de los eventos regionales en el desarrollo del paleo delta, y si es así, de qué forma lo influenciaron. Siguiendo este idea, en la sección Arroyo Piedras, Molinares et al (2012) identificaron para el Plioceno temprano una reducción del aporte siliciclástico en el registro estratigráfico, el cual asocian a una disminución en la carga de sedimentos en el paleo-delta debido a fenómenos tipo

ENOS (El Niño Oscilación Sur), dado que en la actualidad, oscilaciones interanuales como el ENOS están fuertemente correlacionadas con la disminución del aporte de sedimentos en los afluentes en el norte de Suramérica en su fase negativa (Restrepo y Kjerfve, 2000). Sin embargo, para entender los efectos de eventos regionales en la evolución del paleo-delta del Magdalena, es necesario reconocer los ambientes de depositación de las Formaciones Tubará e Hibácharo en diferentes secciones estratigráficas, e identificar claramente patrones estratigráficos asociados a eventos regionales durante la depositación de estas unidades. Para esto, se realizaron análisis de las litofacies para secciones litoestratigráficas depositadas entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano; se reconocieron sus ambientes de depositación; y se identificaron sus patrones estratigráficos.

2 Planteamiento del problema

La evolución del paleo-delta del río Magdalena está registrada en las secuencias mio-pliocenas del norte del CPSJ en el sector de Piojó. Durante el período en el que este se desarrolló ocurrieron varios eventos geológicos, paleo-oceanográficos y climáticos de escala regional. Por ejemplo, entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano se registra exhumación y levantamiento generalizado en múltiples bloques de la Cordillera Oriental, cambiando la configuración de la cuenca del río Magdalena (Anderson et al., 2016; Siravo et al., 2020). Estos procesos podrían ser una respuesta de estructuras heredadas de la placa superior a eventos previos, como la colisión del bloque Panamá-Chocó, o a la horizontalización de la subducción (Anderson et al., 2016; León et al., 2018; Wagner et al., 2017). Independientemente de su edad, el cierre del istmo de Panamá desencadenó múltiples cambios en condiciones paleo-oceanográficas, climáticas y bióticas, de forma global, y de mayor relevancia en la provincia del Caribe (O'Dea et al., 2016). Además, durante el Plioceno

temprano se han identificado periodos más cálidos, atribuidos a fenómenos paleo-oceanográficos y climáticos tipo El Niño permanentes (Wara et al., 2005).

A partir del registro estratigráfico, las sucesiones faunísticas de los foraminíferos reportados en el norte del departamento del Atlántico y de rasgos geomorfológicos de la plataforma Continental del Caribe, se pueden inferir varias migraciones del paleo-delta (Bordine, 1974; Carvajal, 1990; Kolla et al., 1984; Molinares et al., 2012). Por lo tanto, el paleo-delta del río Magdalena inequívocamente se desarrolló de forma dinámica durante un periodo geológicamente activo. La sincronía entre la ocurrencia de múltiples eventos geológicos regionales con las migraciones del paleo-delta del río Magdalena, y la sensibilidad que este posee a cambios regionales debido a que su cuenca drena gran parte del orógeno de los Andes del norte, lleva a las siguientes preguntas de investigación: ¿Es posible reconocer la influencia de eventos regionales en el desarrollo del paleo-delta del río Magdalena a partir del registro estratigráfico?, y ¿Cómo son los patrones estratigráficos asociados a estos eventos?.

3 Objetivo general

Identificar cambios en los ambientes de depositación en las secuencias neógenas del sector de Piojó, relacionados a la evolución del paleo-delta del río Magdalena, y discutir su relación con procesos regionales (alocíclicos) y/o locales (autocíclicos).

4 Objetivos específicos

- Definir la posición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas que afloran en el sector de Piojó, usando los principios de Steno y la sucesión faunística definida para los foraminíferos plantónicos reportados en el área.

- Caracterizar las litofacies predominantes en cada unidad litoestratigráfica, asociarlas y relacionarlas a un ambiente de depositación, teniendo en cuenta observaciones de campo.
- Discutir los resultados en el contexto de posibles controles geológicos regionales o locales sobre los cambios en los ambientes de depositación.

5 Marco geológico

El CPSJ se encuentra en el noroccidente de Suramérica, en las planicies colombianas del Caribe. Consiste de una cadena de serranías discontinuas y cerros alargados, formada por rocas sedimentarias cenozoicas con rumbo preferencial SW-NE (Figura 1). El CPSJ es interpretado como un prisma acrecional formado en el Cretácico Tardío, y deformado durante el Paleógeno (Duque-Caro, 1984; Mora et al., 2017). Este, se encuentra limitado hacia el noroccidente por el sistema de fallas de Sinú, hacia el suroccidente por el sistema de fallas dextrales de Uramita y hacia el sureste por el sistema de fallas de Romeral (Flinch, 2003; Mantilla-Pimiento et al., 2009).

5.1 Cretácico Tardío y Paleógeno

Durante el Cretácico Tardío comenzó la depositación de facies finas y calcáreas sobre un basamento de afinidad oceánica, este periodo se encuentra registrado en la Formación Cansona. Posterior a la colisión y acreción del plateau del Caribe, se registra un primer evento de deformación reconocido por una discordancia paleocena y el aumento de la influencia terrígena en la depositación marina, en lo que hoy se conoce como Formación San Cayetano (Cardona et al., 2012; Osorio-Granada et al., 2019). Entre el Eoceno y Oligoceno temprano, el colapso del orógeno previamente establecido durante la colisión arco-continente desencadena la depositación de varias cuñas clásticas (Formaciones Pendales y Maco) encima de la secuencia marina del Paleoceno (Montes et al., 2019). Posteriormente, la depositación desde el Oligoceno hasta el Mioceno medio se dio en ambientes transicionales, formando sucesiones espesas de areniscas y conglomerados

intercalados con mantos de carbón (Formación Ciénaga de Oro), y en ambientes de plataforma somera formando facies finas laminadas como las de la Formación El Carmén (Aguilera, 2011; Guzmán et al., 2004).

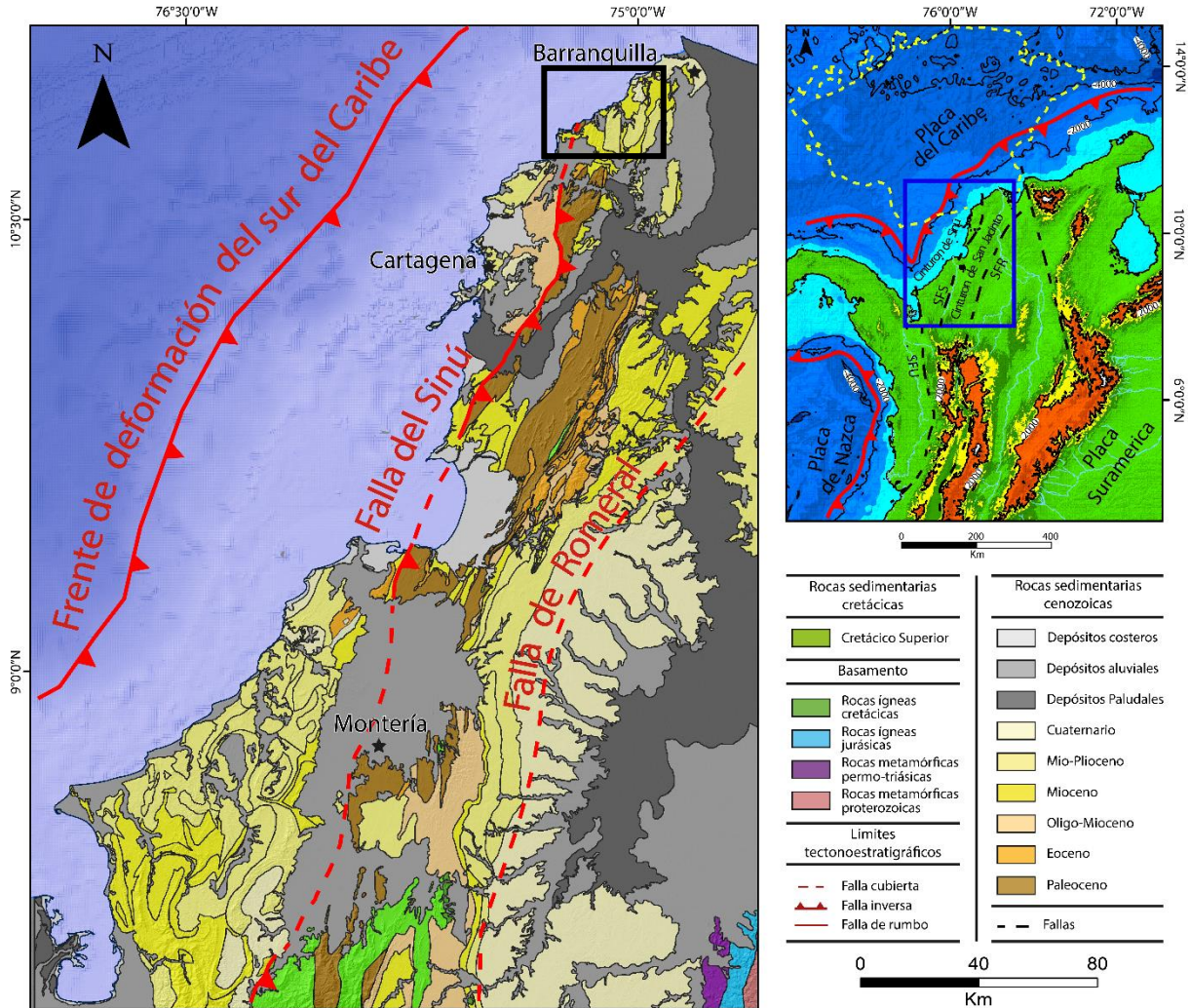


Figura 1. Mapa de unidades cronoestratigráficas del CPSJ, el recuadro negro en el mapa indica la zona de estudio. En el recuadro de la parte superior derecha de la figura se observa la ubicación del CPSJ en los Andes del norte (recuadro azul). La línea amarilla punteada muestra los límites del abanico submarino del Magdalena. SFR: Sistema de fallas de Romeral. SFU: Sistema de fallas de Uramita. SFS: Sistema de fallas de Sinú. Editado de Gómez et al (2015); Idárraga-García et al (2019); Montes et al (2019).

5.2 Neógeno y Cuaternario

Posterior a la secuencia Paleógena, durante el Mioceno medio se depositó una secuencia transgresiva registrada en unidades como las Formaciones Hibácharo y Jesús del Monte. Luego, durante una regresión generalizada entre el Mioceno tardío y el Plioceno se depositaron secuencias

costeras las cuales progradan sobre secuencias depositadas en ambientes de plataforma (Bermúdez, 2016). Este patrón podría estar asociado con el final de la colisión del bloque Panamá-Chocó y el cierre del istmo de Panamá (Mora et al., 2018). Finalmente, en el Cuaternario se desarrolló una depositación fluvial muy similar a la actual, con formación de arrecifes coralinos hacia las costas (Formaciones Betulia y La Popa).

5.3 Estratigrafía del sector de Piojó

Duque-Caro (1979) dividió el CPSJ en tres serranías discontinuas denominadas como anticlinorios de Luruaco, San Jacinto y San Jerónimo. El primero es el que se encuentra más al norte en el departamento del Atlántico, y está formado por las secuencias paleógenas de las Formaciones San Cayetano, Pendales y Arroyo de Piedra, las cuales se pueden interpretar como cuñas clásticas con depositación de carbonatos encima de paleo-altos (Guzmán et al., 2004). De forma discordante, la secuencia Neógena está expuesta en el sector entre Galerazamba y Piojó.

Anderson (1929) definió los Grupos Las Perdices, Tubará y Galapa, les asignó una edad miocena y describió su macrofauna en detalle. El Grupo Las Perdices está compuesto por lodolitas grises, arenosas y ocasionalmente intercaladas con chert; el Grupo Tubará está compuesto por areniscas fosilíferas y lodolitas calcáreas, y es reconocido por su abundancia en macrofauna marina, finalmente el Grupo Galapa consiste de margas, areniscas calcáreas, y calizas coralinas (Anderson, 1926; Anderson, 1929). Luego, Bürgl et al (1955) realizaron un análisis micropaleontológico en la sección Arroyo Saco, le asignaron una edad de Mioceno temprano a medio, y describieron la sección en 3 ciclos sedimentarios que alternan facies lodosas hacia la base y areniscas fosilíferas hacia el tope. Además, establecieron la nomenclatura estratigráfica previamente definida por Raasveldt (1953) basada en relaciones fotogeológicas. Bordine (1974) estudió varias secciones en el sector, analizó ensambles de foraminíferos y asociaciones de icnofósiles. Le asignó una edad de

Mioceno tardío a Plioceno medio a la secuencia de 1980 metros que está expuesta en el Arroyo Saco, basándose en la aparición de *Sphaeroidinellopsis sphaeroides* hacia la base, y la última aparición de *Globigerina nepenthes* (Bordine, 1974; De Porta, 2003). Después, en la sección Arroyo Piedras, Molinares et al (2012) le asignaron una edad de Plioceno temprano a la parte superior de la Formación Tubará, e interpretaron ambientes marino someros a transicionales. Esta interpretación concuerda con la dada por Bermúdez et al (2017) usando ensambles de crustáceos fósiles. Suprayaciendo de forma discordante hacia el sur, afloran depósitos fluviales los cuales Link (1927) definió como las gravas de Rotinet, y les asignó una edad pleistocénica basándose en la posición estratigráfica y en la presencia de mastodontes fósiles. Su extensión hacia el norte no es clara, pero se podría correlacionar con depósitos calcáreos que afloran cerca al municipio de Galapa. Finalmente, hacia la costa, afloran de forma esporádica calizas coralinas intercaladas con margas denominadas como Formación La Popa (De Porta, 2003).

6 Zona de estudio

Las Formaciones Tubará e Hibácharo afloran principalmente en las serranías de Piojó y Tubará en el norte del departamento del Atlántico. La expresión geomorfológica de estas unidades comprende un grupo de cuevas disectadas de bajo relieve y cerros aislados, los cuales siguen la actitud estructural regional. Los acantilados costeros de las bahías de la costa atlanticense representan excelentes afloramientos, debido a que estos son constantemente erosionados por la acción del viento y del oleaje. Las capas tienen un rumbo con sentido N-S, y su buzamiento que varía entre 4 y 35° dependiendo de la estructura subsuperficial. La cartografía geológica (Galeano, 2020) realizada en conjunto con la medición de las secciones estratigráficas discutidas en este trabajo,

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

permitió separar distintas unidades, facilitando la correlación. Las secciones fueron medidas en las lodolitas del Cerro del Furú, y en las Areniscas de Pajuanchó y del Cerro de la Viuda (Figura 2).

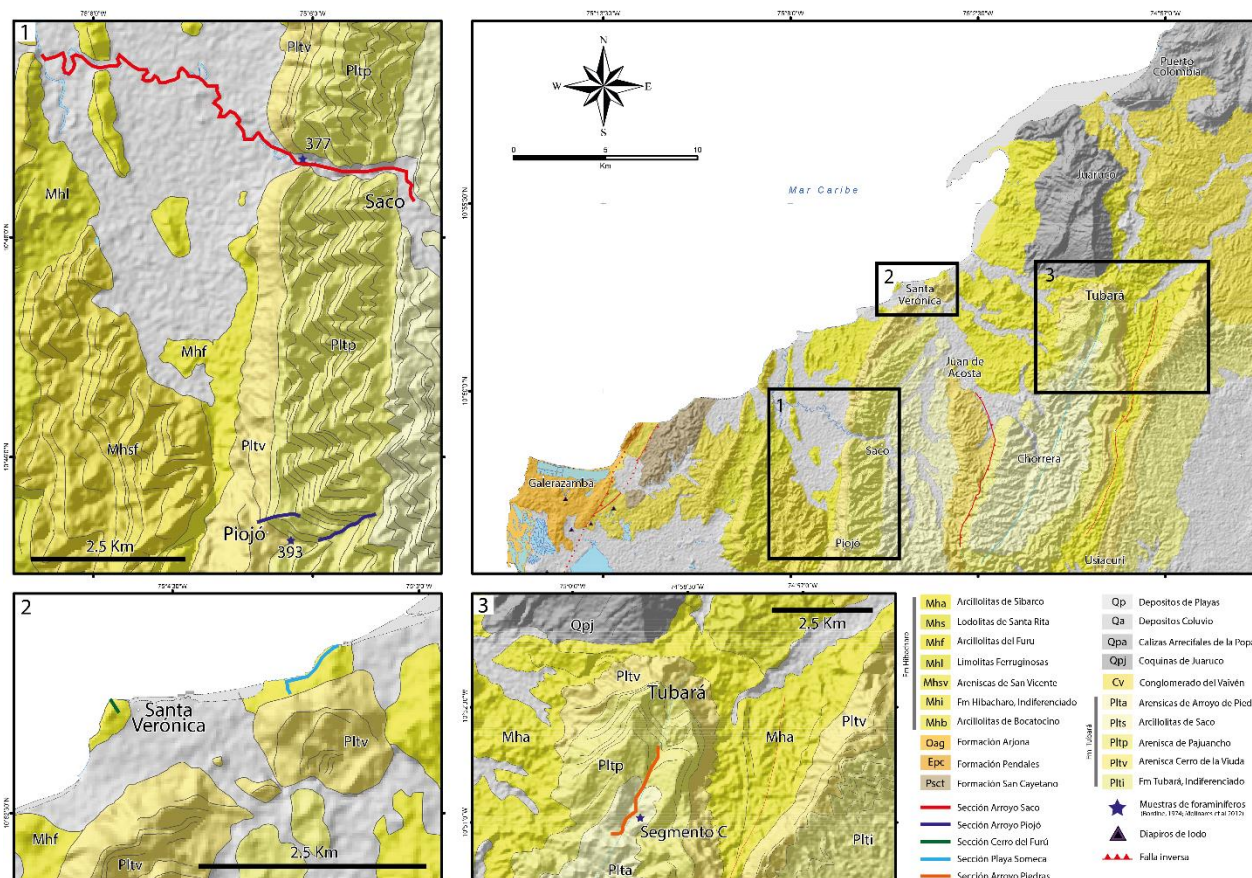


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio. Se observan las secciones estratigráficas medidas en este trabajo, la sección Arroyo Saco (Bordine, 1974) y la sección Arroyo Piedras (Molinares et al., 2012). Las estrellas indican la localización de muestras de foraminíferos planctónicos reportados en la zona.

7 Metodología

7.1 Recopilación bibliográfica

Para la realización de este trabajo, inicialmente se revisaron las memorias de las planchas 16-17 y 24 (Barrera, 2001; Reyes y Zapata, 2001), con el objetivo de contextualizar las Formaciones Tubará e Hibácharo espacialmente en el área de estudio. Posteriormente se revisaron los trabajos realizados en la sección tipo (Bürl et al., 1955; Bordine, 1974) y en la sección Arroyo Piedras (Molinares et al., 2012) con el fin de realizar un marco cronoestratigráfico de estas Formaciones, a partir de los datos reportados, y construir hipótesis previas a la fase de campo.

7.2 Trabajo de campo

Se midieron tres secciones estratigráficas en las localidades de Cerro del Furú, Playa Someca y Arroyo Piojó (Figura 2), usando bastón de Jacob y cinta métrica con el método de la poligonal. Con el bastón de Jacob se midieron directamente los segmentos de roca a partir de transectas paralelas a la dirección de buzamiento. Las medidas se realizaron cada 1.5 metros inclinando el bastón conforme al buzamiento de los estratos, localizando cada punto con una mira laser. En los segmentos donde no fue posible realizar transectas paralelas a la dirección de buzamiento, se realizaron medidas indirectas con cinta métrica, usando el método de la poligonal. Las correcciones de espesor se realizaron in situ, a partir de relaciones trigonométricas teniendo en cuenta la longitud medida, la dirección de buzamiento, el buzamiento, el azimut de la transecta y la pendiente topográfica. En cada segmento medido se describieron de forma sistemática la granulometría, la selección, la redondez, la fábrica, las estructuras sedimentarias, la composición, el color, el contenido fosilífero y los contactos. En la medida de lo posible se describieron los cambios laterales de los cuerpos de roca, la bioturbación e icnogéneros reconocibles.

7.3 Construcción de las columnas estratigráficas

Los datos sedimentológicos obtenidos en campo se almacenaron en la plantilla beds de SDAR (Ortiz y Jaramillo, 2018), y se graficó el espesor, la litología y la gradación en Rstudio a partir del paquete de análisis estratigráfico SDAR. Luego se editaron manualmente las columnas y se le agregaron las estructuras sedimentarias, material fosilífero y bioturbación.

7.4 Análisis de litofacies

Para cada sección estratigráfica medida, se agruparon cuerpos de rocas en litofacies, las cuales se distinguen por tener un conjunto de características particulares con significancia genética

(Dalrymple, 2010). Por ejemplo, la naturaleza y tipo de contactos, la gradación, la selección, las variaciones laterales de los cuerpos de roca, entre otras. A partir de cada litofacies definida se interpretaron los posibles procesos de sedimentación y transporte para cada litofacies, y agrupando aquellas genéticamente relacionadas, se construyeron asociaciones de facies (AF) con significancia paleoambiental, en el sentido de Dalrymple (2010), siguiendo el principio de correlación de facies (ley de Walther).

8 Resultados

8.1 Asociación de facies

En las secciones estratigráficas medidas se identificaron 11 litofacies con significancia genética, posteriormente asociadas en 5 asociaciones de facies (AF). Las características principales de cada litofacies definida se encuentran resumidas en la Tabla 1, y cada asociación de facies se describe a continuación.

8.1.1 Depósitos de prodelta (AF1)

La AF1 consiste de una sucesión rítmica centimétrica de lodolitas macizas y laminadas de la litofacies Lm (Figura 3a), el contenido de materia orgánica es abundante, y se encuentran detritos vegetales. La cual se intercala ocasionalmente con arenitas de grano fino con gradación normal, o laminación paralela de la litofacies Im y lodolitas contorsionadas de la litofacies Fm. La AF1 también es distintiva por la presencia de bloques angulares de la litofacies Asb (Figura 3b) y de lodolitas gravosas lentiformes de la litofacies Dgm (Figura 3c). Basado en la predominancia de la litofacies Lm, La AF1 es interpretada como depósitos de prodelta, donde domina la depositación por decantación y sedimentación de sedimentos en suspensión de plumas homopícnicas (Bhattacharya, 1992; Martini y Sandrelli, 2015).

Código	Litofacies	Espesor (m)	Litología	Estructuras sedimentarias y geometría	Contactos	Otras características	Procesos sedimentarios
Lm	lodolitas laminadas	0.1 - 0.5	Lodolitas grises oscuras.	Capas tabulares con laminación plano-paralela regular e irregular.	Bases y topes netos.	Bioturbación moderada puede obliterar la estructura interna, detritos vegetales y las madrigueras horizontales son frecuentes. El icnogénero <i>Ophiomorpha</i> es reconocible.	Depositación por caída o decantación de sedimentos finos en suspensión (Martini y Sandrelli, 2015)
Asb	Bloques angulares estratificados	2 - 6	Bloques angulares de lodolitas y areniscas interestratificadas, rodeados de matriz de lodo gris oscuro.	Lentes de geometría irregular con bloques angulares dispuestos de forma caótica.	Bases y topes irregulares.	—	Ruptura de paredes de canales y diques asociados al canal (Walker, 1992)
Dgm	Lodolitas gravosas desorganizada	2 - 4	Lodolita gris con cantos y bloques flotantes subredondeados, con conglomerados matriz-soportados locales.	Lentes de geometría irregular compuestos por lodolitas gravosas con calcos de carga en las bases.	Bases irregulares y erosivas, topes irregulares.	—	Transporte por flujos de escombros cohesivos y depositación instantánea (Pickering y Hiscott, 2016)
Fm	Lodolitas contorsionadas	0.1 - 0.3	Lodolitas grises oscuras.	Capas plegadas y contorsionadas con laminación convoluta y estructuras en flama.	Bases y topes netos.	—	Deformación sin-sedimentaria de lodos bajo altas tasas de deposición o entre periodos de sequía y humedad (Ielpi et al., 2012)
Im	Lodolitas y areniscas interestratificadas	0.2 - 1	Lodolitas grises oscuras interestratificadas con areniscas limosas.	Capas tabulares macizas o con laminación plano-paralela.	Bases y topes netos.	Bioturbación moderada puede obliterar la estructura interna, las madrigueras horizontales y los detritos vegetales con frecuentes	Transporte de arenas por flujos hiperpícnicos, o flujos concentrados, donde domina la deposición de sedimentos finos en suspensión (Canale et al., 2015; Martini y Sandrelli, 2015)
H	Heterolitas	0.5 - 4	Lodolitas grises y areniscas limosas interlaminadas.	Capas tabulares interlaminadas que pueden tener laminación ondulosa, lenticular o <i>flaser</i> .	Bases y topes netos o gradacionales.	Bioturbación moderada puede obliterar la estructura interna, tanto las madrigueras horizontales como las verticales son comunes, el icnogénero <i>Skolithos</i> es reconocible	Transporte de sedimentos por corrientes fluctuantes bidireccionales, en los estadios de mayor régimen de flujo se depositan las arenas, mientras que en los de menor régimen de flujo se depositan los lodos (Shanley et al., 1992; Scasso et al., 2012)

Tabla 1. Litofacies definidas

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

Código	Litofacies	Espesor (m)	Litología	Estructuras sedimentarias y geometría	Contactos	Otras características	Procesos sedimentarios
Ms	Areniscas macizas	0.5 - 5	Areniscas macizas de grano medio, subredondeados, bien seleccionadas.	Capas tabulares o elongadas macizas, en ocasiones están amalgamadas.	Bases y topes netos, en ocasiones gradacionales	Bioturbación baja	Transporte de sedimentos por flujos concentrados o flujos hiperpícnicos, depositación instantánea (Canale et al., 2015; Walker, 1992)
C	Coquinas	0.5 - 5	Coquinas, calciruditas y areniscas calcáreas moderadamente seleccionadas. Armazón compuesto de valvas desarticuladas y fragmentos de bioclastos con matriz de arena gruesa subangular.	Capas tabulares o lenticulares, lateralmente extensas con estratificación horizontal bien definida.	Bases y topes netos.	Bioturbación alta, el icnogénero <i>Thalassinoides</i> es reconocible. Presenta un ensamble de bivalvos de baja diversidad, destaca <i>Nodipecten atlanticola</i> .	Transporte de bioclastos por corrientes inducidas por tormentas, o corrientes de resaca, donde domina la depositación de sedimentos finos en suspensión (Sarkar y Koner, 2020).
Hcs	Limolitas con estratificación <i>hummocky</i>	0.5 - 5	Limolitas arenosas grises	Capas lateralmente continuas con estratificación <i>hummocky</i> y <i>swaley</i> . Las capas tienen intraclastos en las bases	Bases irregulares y erosivas, topes netos.	————	Retrabajamiento de sedimentos finos por corrientes oscilatorias y posterior depositación, o migración de dunas bajo flujos combinados (Dumas y Arnott, 2006; Morsilli y Pomar, 2012)
Ps	Areniscas estratificadas	0.2 - 1	Areniscas de grano fino a medio, con selección buena a moderada, granos subangulares a subredondeados, que se intercala con areniscas de grano fino con matriz lodosa oxidada	Capas tabulares estratificadas con laminación plano-paralela o laminación cruzada planar, dependiendo de la bioturbación puede ser maciza	Bases y topes netos o gradacionales.	Bioturbación moderada a alta oblitera la estructura interna, el icnogénero <i>Skolithos</i> es reconocible, las madrigueras son verticales, ocasionalmente en los topes presentan rizaduras, grietas de desecación e impresiones de gotas de lluvia	Depositación de arenas bajo corrientes con alto régimen de flujo, o por flujos laminares (Clifton, 2007; Payros et al., 2000)
Rs	Areniscas con laminación <i>ripple</i>	0.5 - 1	Areniscas de grano fino bien seleccionadas con granos subangulares a subredondeados.	Capas lenticulares con laminación <i>ripple</i> simétrica y asimétrica.	Bases y topes gradacionales	————	Depositación de arenas bajo corrientes oscilatorias inducidas por ondas, o por corrientes unidireccionales inducidas por el asomeramiento de las ondas (Reading y Collinson, 1996).

Tabla 1. Litofacies definidas. Continuación.

La abundancia de materia orgánica y de detritos vegetales indican influencia continental, además la aparición de la facies Dgm que grada lateralmente a la facies Asb, es interpretada como depósitos de canal submarino con rupturas de diques asociados al canal (Pickering y Hiscott, 2016; Walker, 1992). Lo cual junto con la presencia de la facies Fm indica altas tasas de depositación, generando inestabilidades en el ambiente, típico de un prodelta (Bhattacharya, 2010). La escasa aparición de las areniscas de la litofacies Im con detritos vegetales, también indica influencia fluvial distal a partir de flujos hiperpícnicos (Canale et al., 2015).

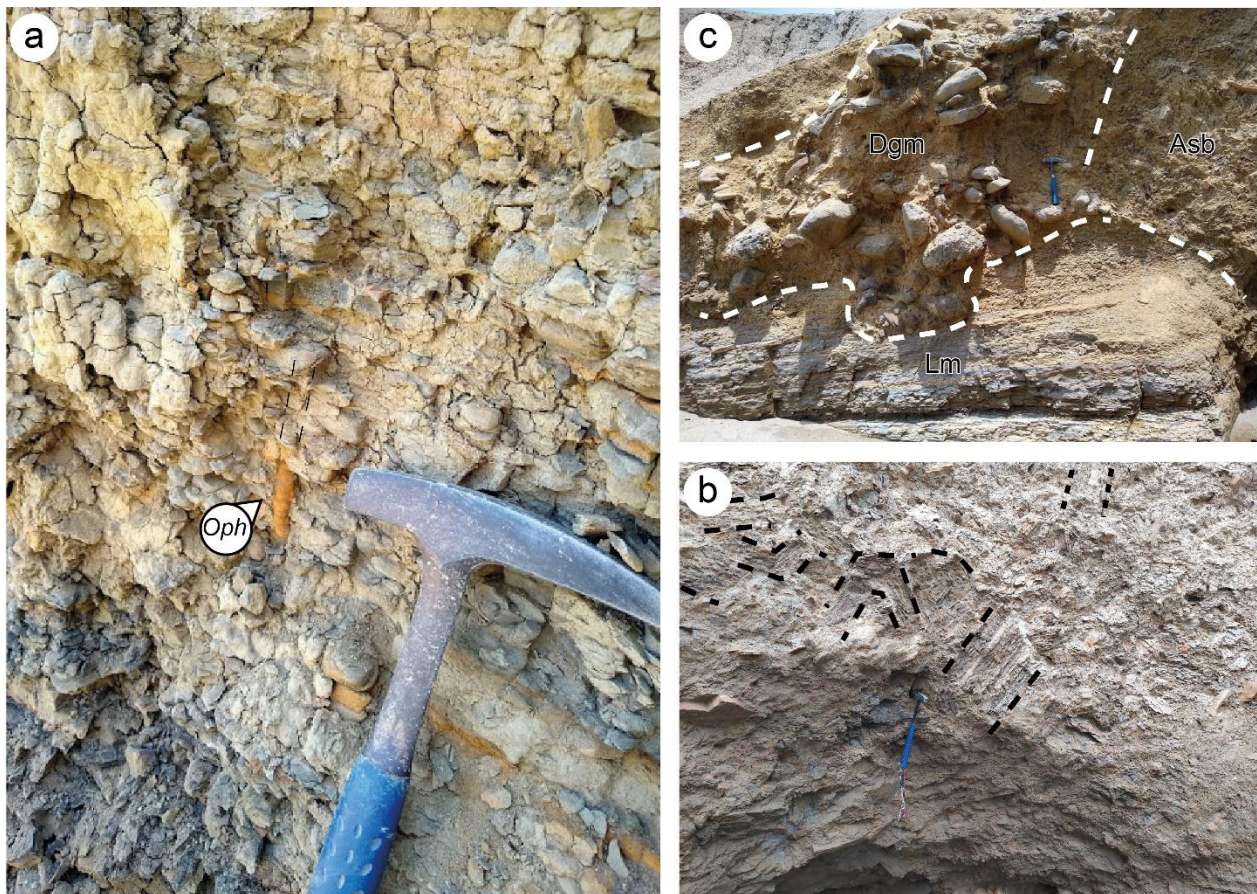


Figura 3. Depósitos de prodelta (AF1). **a.** Lodolitas laminadas de la litofacies Lm, se reconoce el icnogénero *Ophiomorpha* (Oph). **b.** Lodolitas gravosas y conglomerados matriz-soportados de la litofacies Dgm. **c.** Bloques angulares de lodolitas y areniscas interestratificadas de la litofacies Asb.

8.1.2 Depósitos de prodelta proximal a frente deltaico (AF2)

La AF2 es similar a la AF1, sin embargo, la razón de Arena/Lodo (A/L) aumenta, la litofacies Im es dominante, se dan en couplets que pueden llegar a las decenas de metros de repetición (Figura

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

4a), y es frecuente encontrar detritos vegetales en las bases de las areniscas de la litofacies Im (Figura 4b). En general la AF2 muestra un patrón grano y estrato creciente, y está asociada a los depósitos de prodelta de la AF1. La presencia de la litofacies Lm, y la relación que se observa entre la AF1 y los depósitos de prodelta, sugiere depositación en ambientes de baja energía dominados por la decantación o sedimentación de sedimentos finos en suspensión. Sin embargo, el aumento en la razón A/L debido a la dominancia de la litofacies Im indica influencia fluvial más proximal, dado a que estas facies se depositan a partir de flujos hiperpícnicos, producidos en los deltas durante épocas de inundación o tormentas (Bhattacharya, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, se interpretó la AF2 como depósitos de prodelta proximal a frente deltaico.

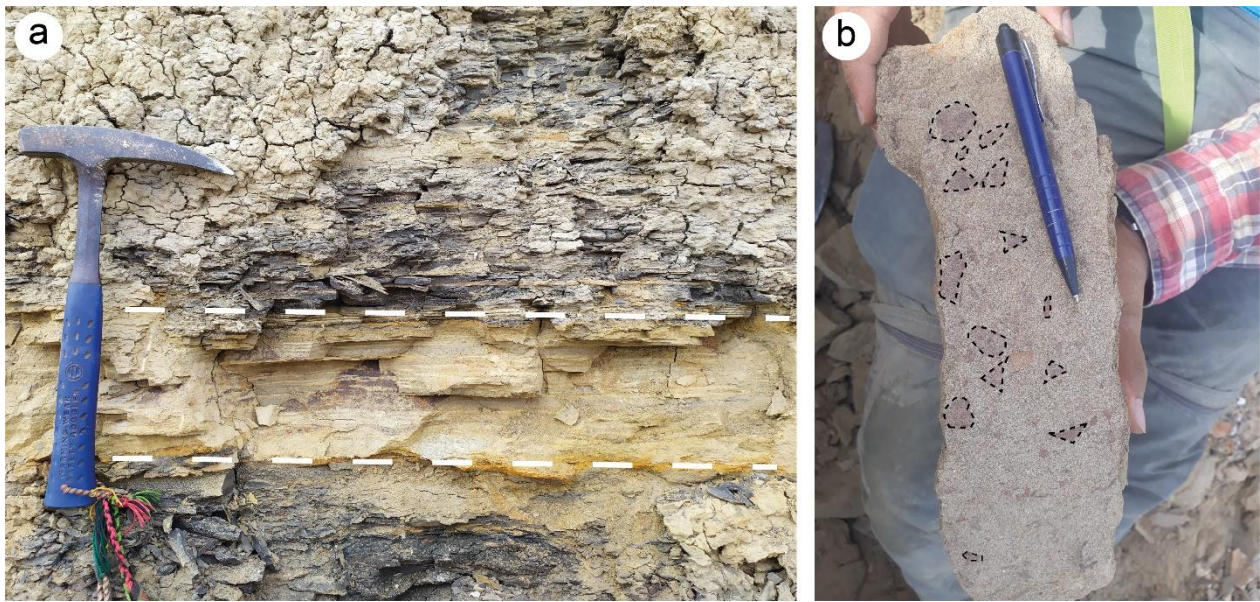


Figura 4. a. Areniscas laminadas y lodolitas de la litofacies Im. b. Detritos vegetales en las areniscas de grano muy fino de la litofacies Im.

8.1.3 Depósitos de frente deltaico (AF3)

La AF3 está compuesta principalmente por heterolitas rítmicas de la litofacies H (Figura 5a), las cuales están organizadas en sucesiones grano y estrato crecientes. Las areniscas macizas de la litofacies Ms son frecuentes, y se disponen en cuerpos lateralmente extensos, en ocasiones amalgamados (Figura 5b). En la AF3 también se encuentran areniscas bien seleccionadas de

geometría lenticular con laminación cruzada planar, con fragmentos fósiles hacia las bases (Figura 5c). En menor medida se encuentran grietas de sinéresis en los topos de las areniscas (Figura 5d), areniscas macizas interestratificadas con lodolitas de la litofacies Im, y lodolitas laminadas de la litofacies Lm, las cuales son cortadas por los cuerpos lenticulares anteriormente descritos. La bioturbación es moderada y en ocasiones oblitera la estructura interna.

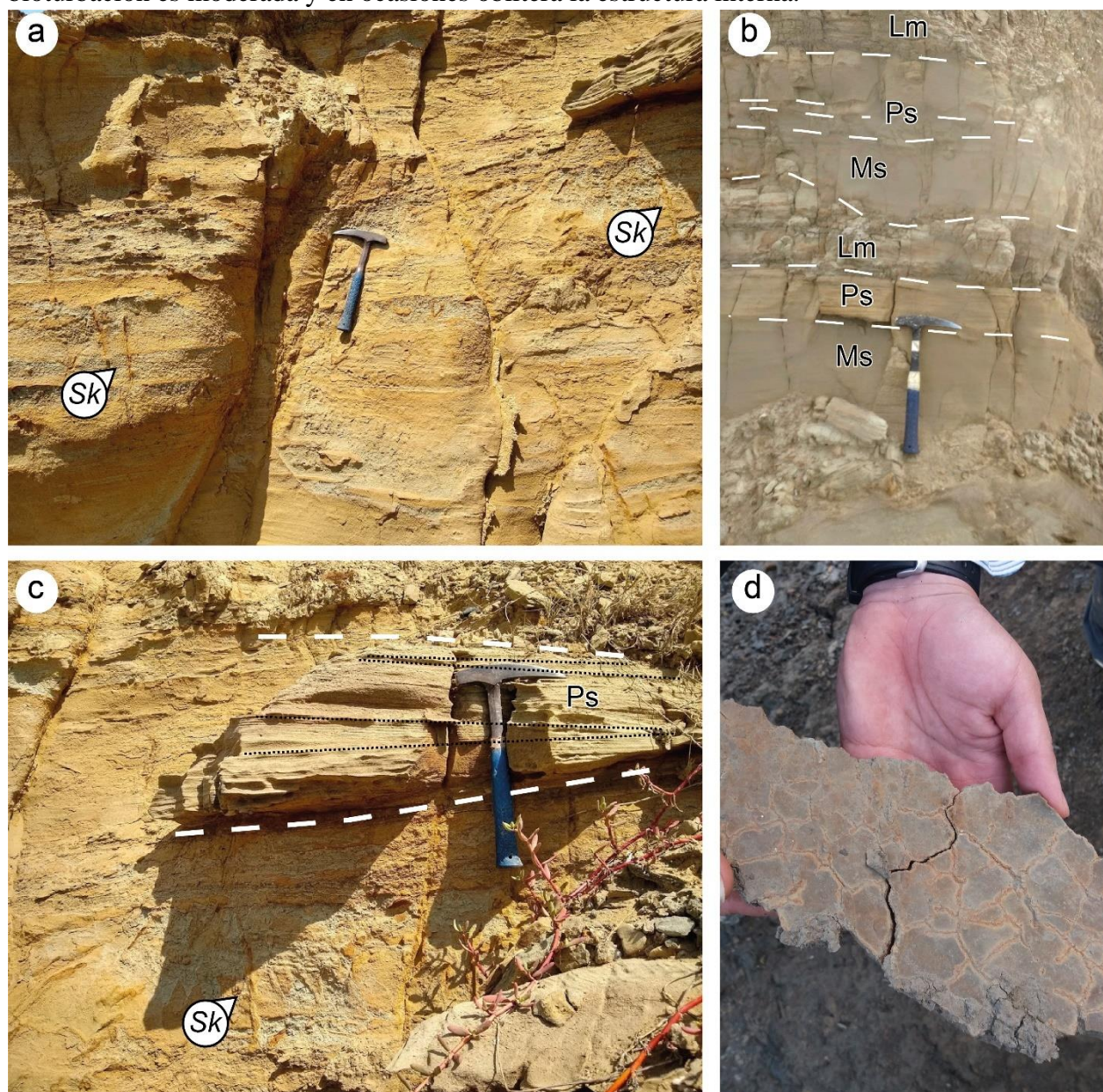


Figura 5. Depósitos de frente deltaico. **a.** Heterolitas de la litofacies H, se reconoce el icnogénero *Skolithos* (Sk). **b.** Areniscas macizas de la litofacies Ms, amalgamadas con areniscas con laminación paralela en patrones grano-decrescentes debido a deposición por flujos menguantes. **c.** Cuerpos de areniscas lentiformes con laminación cruzada planar cortando secuencias heterolíticas, se reconoce el icnogénero Sk. **d.** Grietas de sinéresis.

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

En contraste con las asociaciones anteriores, en la AF3 la razón A/L es mayor, y dominan niveles heterolíticos y de areniscas macizas o con estructuras tractivas. Esto, junto con la escasa presencia de facies finas, indica que los procesos tractivos tienen mayor influencia en la sedimentación. La presencia de detritos vegetales en las areniscas sugiere influencia fluvial, y los cuerpos tabulares macizos pueden resultar de la depositación a partir de flujos hiperpícnicos (Canale et al., 2015). Las grietas de sinéresis pueden reflejar cambios en la salinidad del medio, lo cual está asociado a descargas de agua dulce (Bhattacharya, 2010). Además, el patrón grano y estrato creciente de algunos niveles en la asociación muestra que los procesos fluvio-derivados dominan en la sedimentación. La presencia de estructuras heterolíticas como las flaser sugiere influencia de corrientes bidireccionales como la marea (Scasso et al., 2012; Shanley et al., 1992). Teniendo en cuenta lo anterior se interpretó la AF3 como depósitos de frente deltaico.

8.1.4 Depósitos de frente de playa superior (AF4)

La AF4 está compuesta principalmente por las areniscas estratificadas de la litofacies Ps, que se presentan en cuerpos tabulares macizos o con laminación cruzada planar (Figura 6a). Estos cuerpos generalmente se asocian con las areniscas de la litofacies Rs, las cuales tienen laminación ripple simétrica y asimétrica (Figura 6b). Ocasionalmente se encuentran areniscas limosas oxidadas con estratificación convoluta, ondulitas de corriente y grietas de desecación con marcas de gotas de lluvia. la bioturbación por lo general es alta y oblitera las estructuras internas de las litofacies, el icnogénero *Skolithos* es abundante. Los fragmentos de moluscos son comunes, y se encuentran placas fragmentadas angulares de *sand dollars*. La AF4 es interpretada como depósitos de frente de playa superior. La ausencia de litofacies finas, y la presencia de areniscas con laminación *ripple* simétrica y asimétrica indican influencia de flujos oscilatorios como los producidos por el oleaje (Boyd, 2010), y flujos combinados inducidos por el asomeramiento del oleaje (Payros et al., 2000).

La presencia de laminaciones plano-paralelas y cruzadas planares sugieren depositación de arenas bajo corrientes de alto régimen de flujo como los que se dan en la zona de swash (Clifton, 2007; Reading y Collinson, 1996). La energía producida por el oleaje impide la depositación de sedimentos finos, y fragmenta los bioclastos. La presencia de grietas de desecación asociadas a laminación convoluta e impresiones de gotas de lluvia indican ambientes sub aéreos, con periodos húmedos y secos (Ielpi et al., 2018).

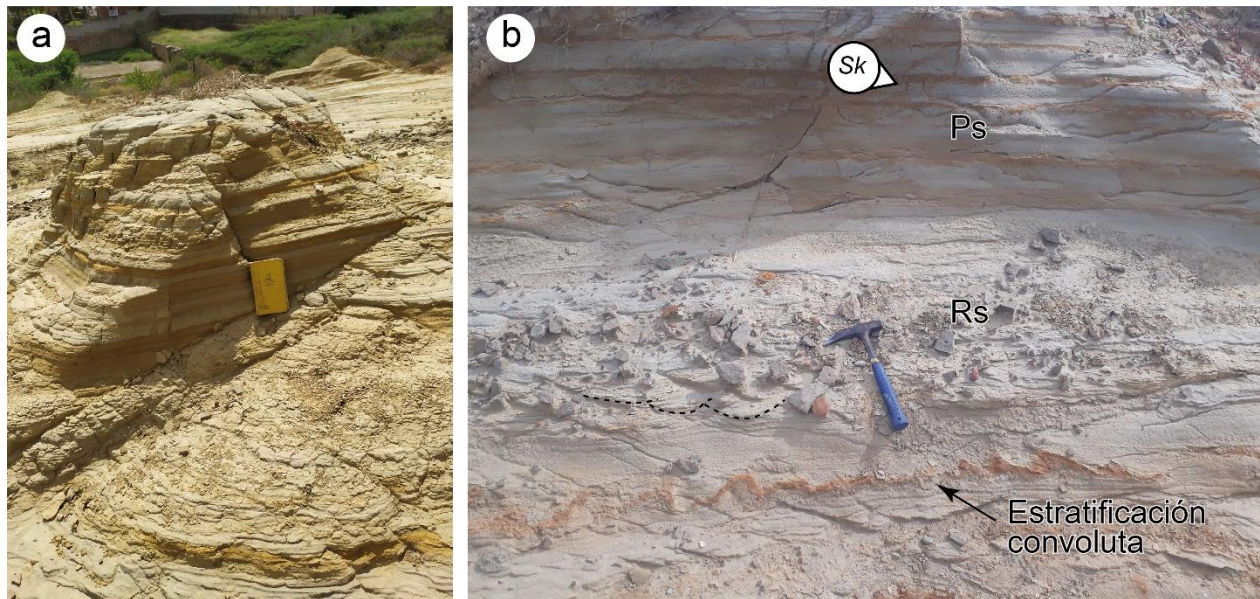


Figura 6. Depósitos de frente de playa superior. **a.** Areniscas estratificadas de la litofacies Ps. **b.** Sucesión de facies de la AF4, se observa una capa fina de areniscas lodosas oxidadas con estratificación convoluta, areniscas con laminación *ripple* simétrica y areniscas bioturbadas, se reconoce el icnogénero *Skolithos* (Sk).

8.1.5 Depósitos de plataforma – frente de playa inferior (AF5)

La AF5 está compuesta por lodolitas laminadas y macizas de la facies Lm (Figura 7a), ocasionalmente se encuentran areniscas laminadas de la facies Im y heterolitas (litofacies H). En esta asociación es importante la presencia de las coquinas de la facies C (Figura 7a) y las limolitas de la facies Hcs (Figura 7b). La dominancia de la facies Lm indica ambientes tranquilos, donde domina la depositación por decantación de sedimentos en suspensión, la ausencia de materia orgánica, fragmentos de hojas y otros productos derivados del continente en las lodolitas indican que no existe influencia continental en la depositación (Bhattacharya, 2010). Las coquinas de la

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

litofacies C, infra y suprayacidas por lodolitas de la litofacies Lm se pueden interpretar como depósitos de tormentas, debido a que las corrientes inducidas por estas tienen la competencia suficiente para transportar bioclastos de bancos de conchas costa adentro (Sarkar y Koner, 2020). Además, la presencia de limolitas con estratificación Hummocky refuerza la influencia del oleaje de tormenta en la sedimentación (Dumas y Arnott, 2006; Morsilli y Pomar, 2012). Teniendo en cuenta lo anterior, la AF5 es interpretada como depósitos de frente de playa inferior, y de plataforma.

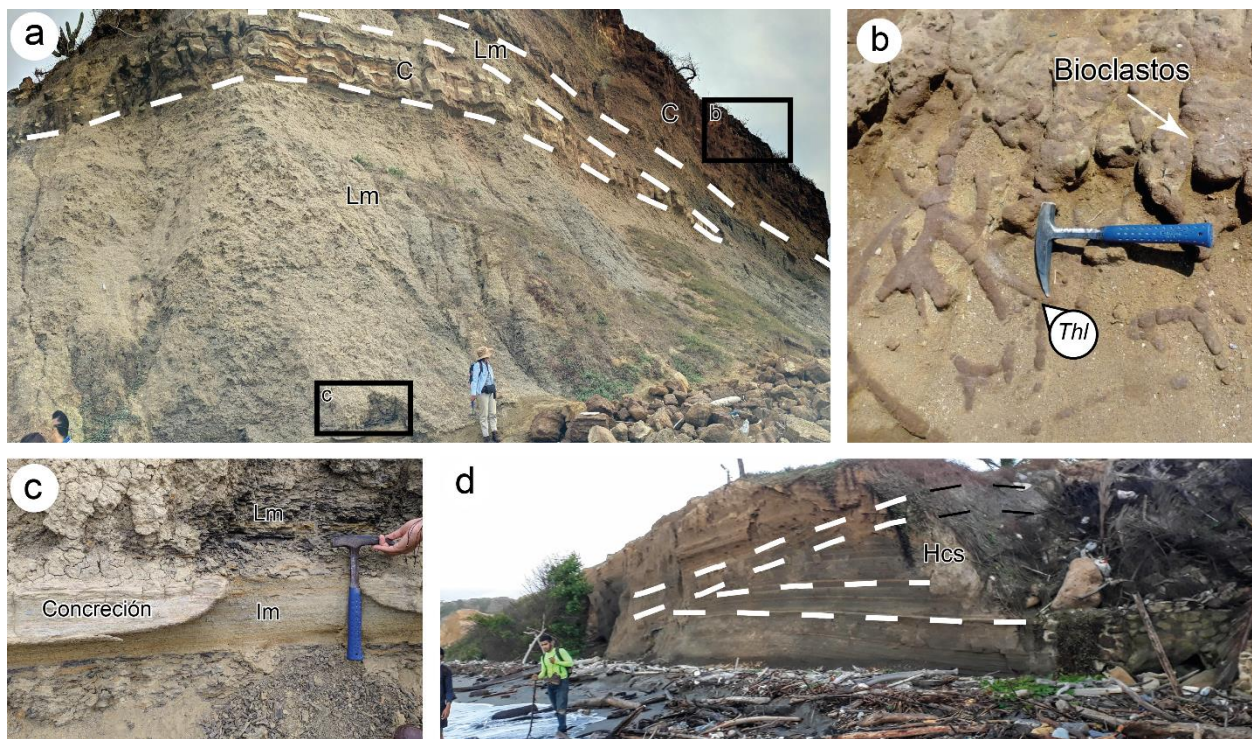


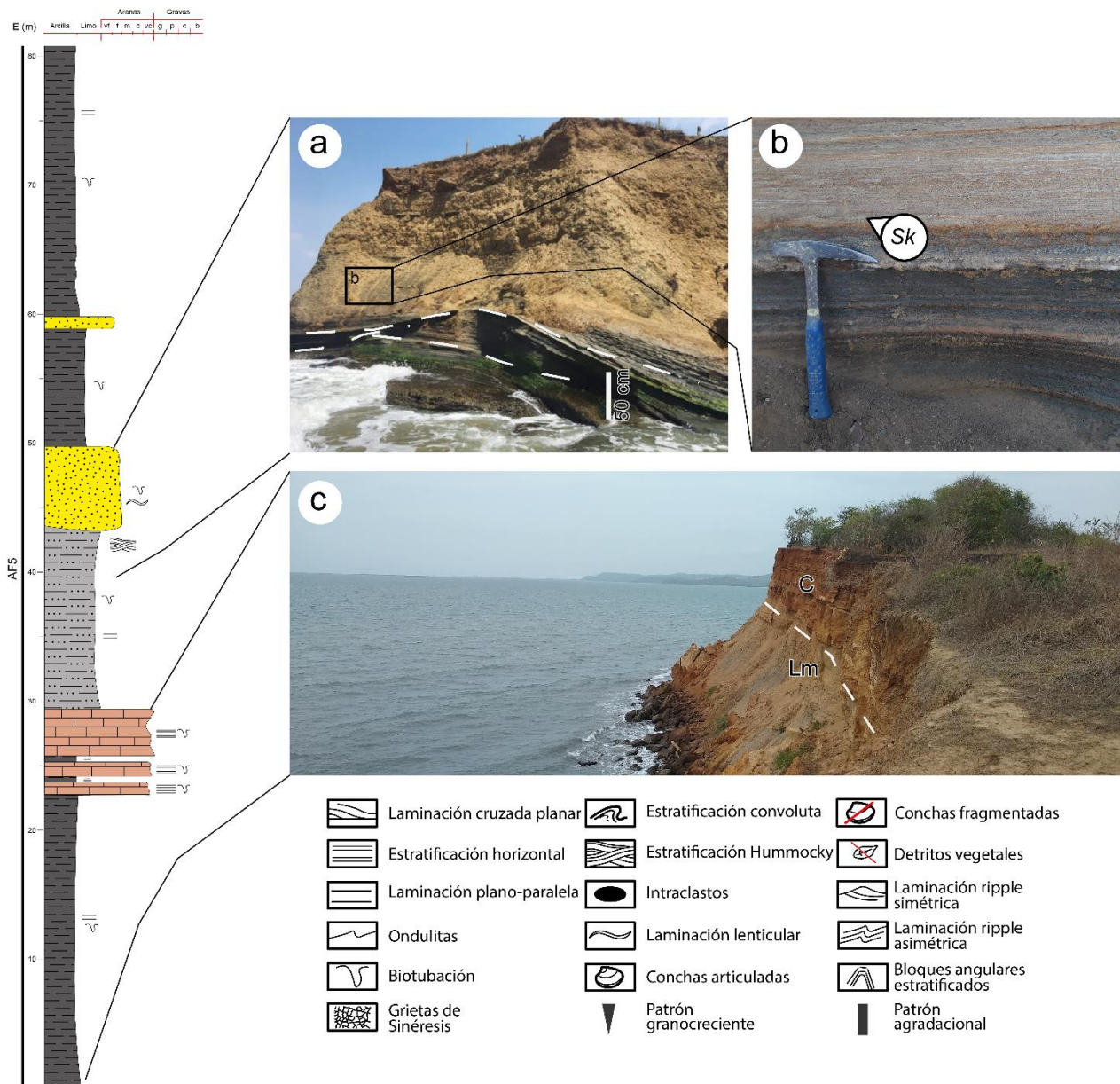
Figura 7. Depósitos de plataforma – frente de playa inferior. **a.** Lodolitas Lm y coquinas de la litofacies C. **b.** Detalle del tope de las coquinas de la litofacies C, se observan bioclastos desarticulados centimétricos y se reconoce el icnogénero *Thalassinoides* (Thl). **c.** Detalle de las lodolitas laminadas, intercaladas con areniscas de la litofacies Im, se observa una concreción alargada. **d.** Limolitas con estratificación *hummocky* (Hcs), las truncaciones simétricas de tercer orden indican que es un *hummock* isotrópico, tiene aproximadamente 7 metros de longitud de onda.

8.2 Secciones estratigráficas

En este apartado se describe brevemente: la localización de cada localidad en la que se midieron las columnas estratigráficas; el punto de inicio y fin de cada sección estratigráfica; y la distribución de los ambientes de depositación previamente interpretados en las columnas medidas.

8.2.1 Sección Playa Someca (PS)

La sección PS se encuentra ubicada al este de la desembocadura del arroyo Juan de Acosta, cerca de las playas Someca y Palmarito. El punto de inicio de la poligonal está en las coordenadas (N10.892092, W75.057644), y el punto final está en las coordenadas (N10.887880, W75.063589). La sección PS tiene 81 metros estratigráficos, y está conformada totalmente por depósitos de frente de playa inferior y de transición a ambientes de plataforma (FA5). En la parte media de la sección son predominantes las facies C y la Hcs, con sets métricos en espesor (Figura 8).



*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

Figura 8. Columna estratigráfica de la sección Playa Someca. **a.** Limolitas con estratificación *hummocky* isotrópica. **b.** Detalle de la litofacies H que está justo por encima de las limolitas con estratificación *hummocky*, se observan laminaciones lenticulares y *flaser*, y se reconoce el icnogénero *Skolithos* (Sk). **c.** Afloramiento de acantilado costero donde se observa el predominio de la litofacies Lm en la sección, esta se intercala hacia la mitad de la columna con coquinas y calciruditas rojizas de la litofacies C.

8.2.2 Sección Cerro del Furú (CF)

La sección CF se encuentra ubicada en el corregimiento de Santa Verónica, en el acantilado costero más alto del corregimiento, justo a la izquierda del Hotel Juanmar. El punto de inicio de la poligonal está en las coordenadas (N10.886628, W75.081201), y el punto final está en las coordenadas (N10.885695, W75.081318). La sección CF tiene 55 metros estratigráficos, y hacia la base se identificaron depósitos de prodelta (AF1), suprayacidos por depósitos de prodelta proximal con patrones grano y estrato crecientes (AF2), el contacto entre ellos es gradacional. En la parte intermedia de la sección se identificaron depósitos de frente deltaico, estos presentan patrones grano y estrato crecientes, y son limitados al tope por un contacto neto, y suprayacidos por depósitos de frente de playa superior (Figura 9).

8.2.3 Sección Arroyo Piojó (AP)

La sección AP se encuentra ubicada en la Reserva Natural de Los Charcones de Piojó, muy cerca a la cabecera municipal de Piojó. La mejor exposición de roca se encuentra en el lecho del arroyo Piojó, aunque en los senderos de la reserva se encuentran afloramientos modestos. En esta sección se exponen algo más de 300 metros estratigráficos. El punto de inicio de la poligonal está en las coordenadas (N10.756540, W75.107090), y el punto final está en las coordenadas (N10.758062, W75.088390). En la base de la sección AP se identificaron depósitos de frente de playa superior (AF4), estos son limitados al tope por coquinas. Luego empieza una depositación cíclica que empieza con depósitos de plataforma – frente de playa inferior (AF5), que gradan con patrones

grano y estrato crecientes a depósitos de frente de playa superior. Cada ciclo es separado por capas delgadas (30 – 50 cm) de coquinas compuestas por bioclastos desarticulados y retrabajados dispuestos de forma caótica. Posteriormente se reconocieron depósitos de frente de playa suprayaciendo los ciclos anteriormente mencionados (Figura 10).

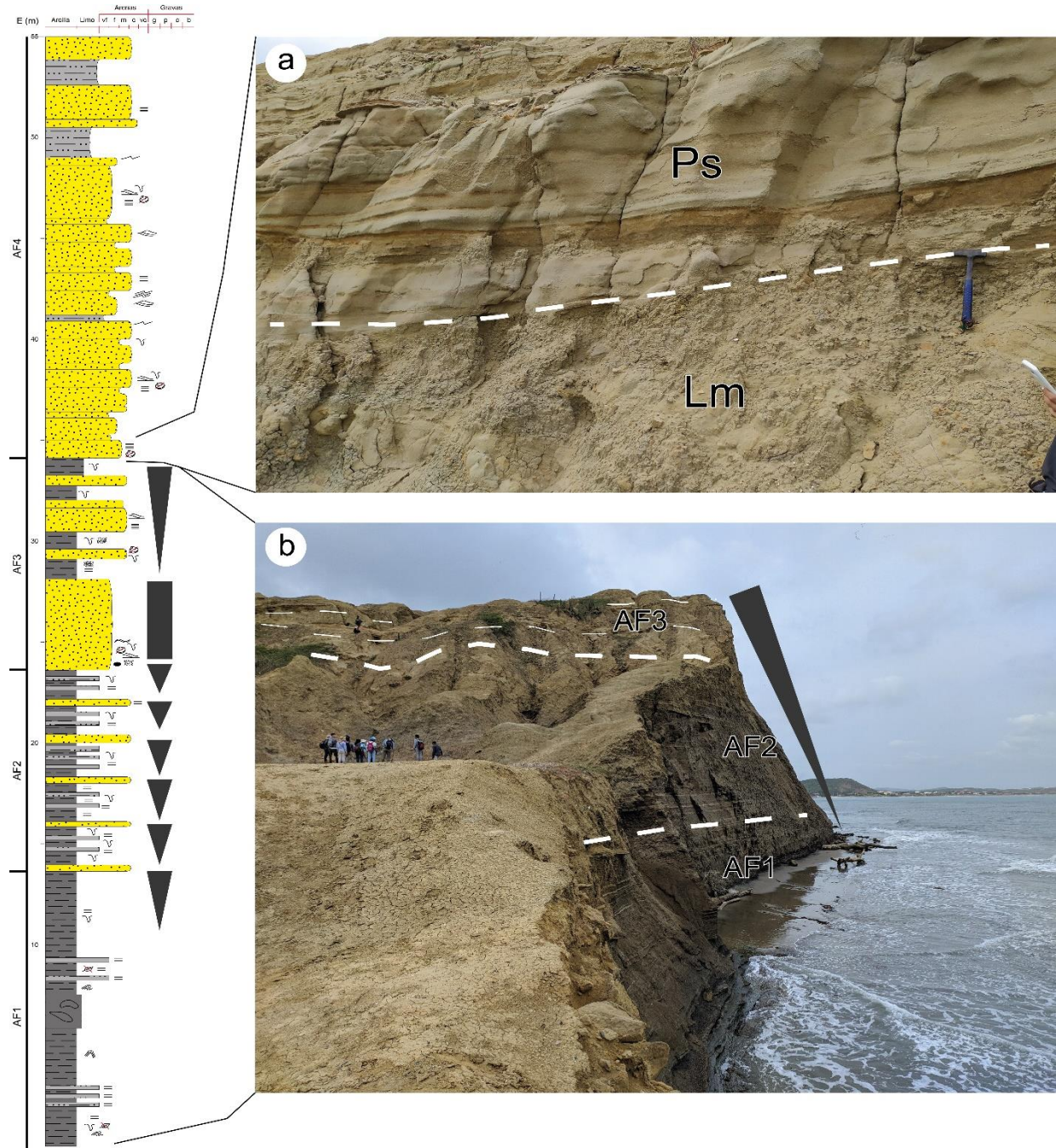


Figura 9. Columna estratigráfica de la sección Cerro del Furú. **a.** contacto neto entre la AF3 y AF4, se observa el último intervalo lodoso de la AF3 suprayacido por areniscas con laminación plano-paralela. **b.** Vista general de la sección CF, se observa cómo van apareciendo niveles más arenosos hacia el tope (líneas punteadas finas) y que en general la sección presenta un patrón grano creciente.

*Cambios en los ambientes de deposición
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

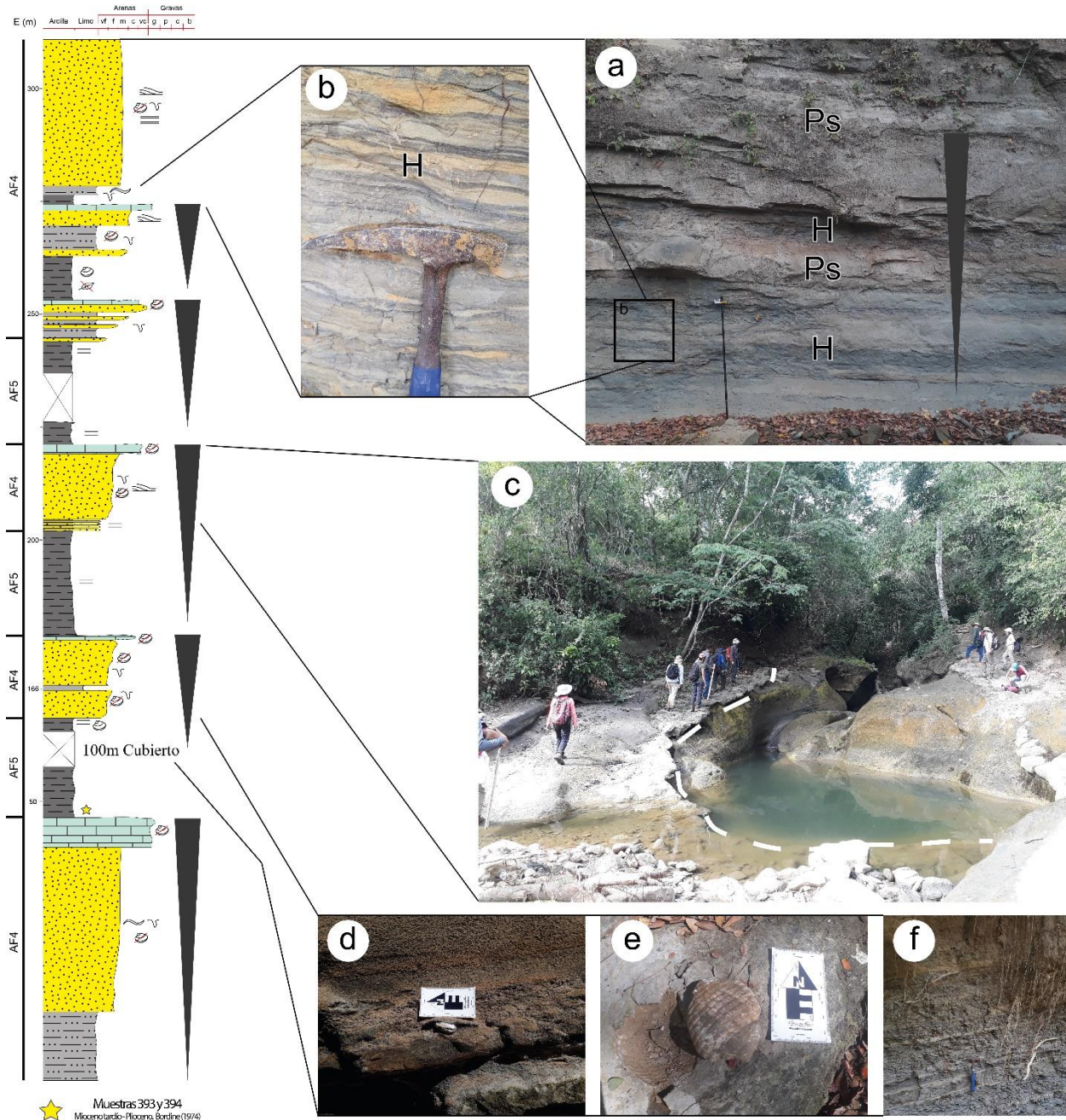


Figura 10. Columna estratigráfica de la sección Arroyo Piojó. **a.** Secuencia grano y estrato creciente entre las litofacies H y Ps. **b.** Detalle de las heterolitas con laminación flaser. **c.** Secuencia grano creciente que limita al tope con coquinas y areniscas calcáreas (línea blanca punteada), este contacto es interpretado como una superficie transgresiva de erosión marina. **d. e.** Moluscos articulados en posición de vida que se encuentran en las lodolitas laminadas de la litofacies Lm. **f.** Secuencia de lodolitas laminadas que se agrupan en se intercalan con areniscas de grano muy fino.

9 Discusión

9.1 Posición estratigráfica y edad

En el sector de Piojó, a lo largo del escarpe de los cerros del Capiro y el Pajuancho, se delimitó un límite litoestratigráfico que marca el contacto entre las secuencias lodosas y heterolíticas de la Formación Hibácharo (Lodolitas del Cerro del Furú) y las secuencias arenosas y calcáreas de la Formación Tubará (Areniscas del Cerro de la Viuda) (Figura 2). En este sector la estructura es un monoclinal continuo que buza hacia el SE entre 10 y 15°. Siguiendo los principios de Steno, se le asigna una edad relativa más antigua a las secciones que están más hacia el occidente, por lo tanto, las secciones Cerro del Furú y Playa Someca son más antiguas que la sección AP.

Bordine (1974) analizó los ensambles de foraminíferos de secciones estratigráficas que cortan el límite litoestratigráfico mencionado anteriormente (Figura 2), la concurrencia de *Globorotalia margaritae* y *Globigerinoides obliqua* en la sección Arroyo Saco, y la aparición de *Sphaerodinellopsis sphaeroides* en el Arroyo Piojó (Bordine, 1974) corresponden a un intervalo entre el tope de la zona N17 y la base de la zona N19 (Bolli y Saunders, 1985; Blow, 1969), sugiriendo una edad entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano. Esto implica que el límite litoestratigráfico mencionado anteriormente coincide muy bien con aquel definido por la concurrencia de foraminíferos planctónicos. Teniendo en cuenta que las secciones que están al occidente del límite litoestratigráfico son más antiguas, se infiere que las secciones Cerro del Furú y Playa Someca son pre-pliocénicas en edad, mientras que la sección Arroyo Piojó se depositó en el Plioceno temprano.

En el tope de la sección Arroyo Saco, la ocurrencia de *Globorotalia aemiliana* y *Globorotalia crassacrottonensis* la ubican en el Plioceno Medio (Bordine, 1974). Mientras que, en el tope de la

En el segmento C de la sección Arroyo Piedras (Molinares et al., 2012), la concurrencia de *Globigerinoides ruber* y *Globigerinoides obliqua*, corresponde al tope de la zona N18 (Bolli y Saunders, 1985). Indicando que este segmento de la sección también se depositó en el Plioceno temprano (Molinares et al., 2012), por lo cual sería correlacionable con la base de la sección Arroyo Piojo y la sección del Arroyo Saco por encima de la muestra 377 de Bordine (1974) (Figura 11).

<i>Bordine (1974) Muestra 377</i> <i>Arroyo Saco</i>	<i>C.E. Molinares et al (2012)</i> <i>Arroyo Piedras</i>	<i>Bordine (1974) Muestra 393 y 394</i> <i>Arroyo Piojó (Chiaonova)</i>
---	---	--

25

9.2 Ambientes de depositación

Los patrones estratigráficos asociados a los ambientes de depositación en una cuenca están directamente controlados por la relación entre el espacio de acomodación y la tasa de sedimentación/erosión en la cuenca (Walker, 1992). Los cambios en estas dos variables pueden ser afectados por procesos autocíclicos como cambios locales en el nivel de base, o por procesos alocíclicos (externos a la cuenca), y dependiendo de la incidencia de estos procesos en la sedimentación y su naturaleza, se tendrán distintos tipos de patrones estratigráficos reconocibles a partir del estudio de los ambientes de depositación y cambios en las sucesiones de facies (Dalrymple, 2010).

Teniendo en cuenta la descripción de cada asociación de facies, y la temporalidad de ellas en la secuencia, se pueden interpretar ambientes de depositación y reconocer patrones estratigráficos. Para el Mioceno tardío es interpretado un ambiente deltaico. La sucesión de facies de ambientes de prodelta que pasan a ambientes de frente deltaico en la sección CF representan la fase progradacional del delta (Bhattacharya, 2010; Boyd, 2010). La abundancia de materia orgánica, detritos de plantas y otros productos continentales en los depósitos de prodelta y frente deltaico; la escasez de estructuras inducidas por corrientes oscilatorias o bidireccionales, y la dominancia de cuerpos masivos ocasionalmente con estructuras tractivas, sugieren predominancia de procesos fluviales en el sistema (Canale et al., 2015; Scasso et al., 2012). Sin embargo, dependiendo de las variaciones estacionales y la combinación de uno a más procesos tanto autocíclicos como alocíclicos, la configuración del sistema deltaico puede cambiar (Bhattacharya, 1992). La fase progradacional del delta es interrumpida por un contacto neto con depósitos costeros suprayacentes (Figura 9a), los cuales están afectados principalmente por el oleaje. Este cambio en la sedimentación es interpretado como una superficie transgresiva de significancia local que registra

una migración del lóbulo de frente deltaico. Para el mismo tiempo, hacia el este, en la sección PS se identificaron procesos depositacionales vinculados a ambientes de transición entre plataforma y frente de playa inferior. A partir del estudio de las litofacies no se reconocieron productos fluvio-derivados en esta sección, por el contrario, se identificó una fuerte componente de depósitos asociados a tormentas, lo cual restringe la geometría del sistema deltaico hacia el este, debido a que este no influye en la sedimentación de los depósitos de la sección PS. El patrón estratigráfico en general es progradacional, y este es claro en la sucesión de facies de la sección CF. Esto concuerda con las observaciones de Bordine (1974) y Molinares et al (2012) los cuales identifican el mismo patrón estratigráfico para el Mioceno tardío.

Para el Plioceno temprano, en la sección AP es claramente reconocible un patrón cíclico en la sedimentación, donde se identificaron depósitos de transición entre plataforma y frente de playa inferior los cuales gradan con patrones grano y estrato crecientes a depósitos de frente de playa superior. Cada ciclo termina al tope con una capa de coquinas (Figura 10c) las cuales son interpretadas como superficies transgresivas de erosión marina (Dalrymple, 2010). Es posible que estos ciclos sedimentarios estén influenciados por un sistema deltaico dominado por el oleaje (Bhattacharya, 2010), sin embargo, no se identificaron elementos deltaicos en la sucesión de areniscas.

9.3 Patrones estratigráficos regionales y cambios en los ambientes de depositación

La influencia de fenómenos tipo ENOS en la reducción de la carga de sedimentos en los ríos durante su fase negativa, explicaría la reducción de aporte siliciclástico encontrado en el segmento C de la sección de Arroyo Piedras durante el Plioceno temprano (Molinares et al., 2012). Sin embargo, para verificar y reforzar esta hipótesis es necesario encontrar el mismo patrón estratigráfico en sucesiones de roca depositadas durante el Plioceno temprano en otras secciones

estratigráficas del país. Como se ha discutido previamente, la sección AP es cronocorrelacionable con el segmento C de la sección Arroyo Piedras. El patrón estratigráfico cíclico identificado en la sección AP, conformada por secuencias netamente siliciclásticas, contrasta con aquel encontrado en el segmento C de la sección Arroyo Piedras, indicando la significancia local de esta superficie y demostrando que no existe evidencia estratigráfica de patrones retrogradacionales de escala regional en el sector norte del departamento del Atlántico. Sin embargo, con estudios bioestratigráficos integrados con análisis de facies detallados, tanto en la vertical como en la lateral en el antiguo lóbulo deltaico de Galerazamba (Kolla et al., 1984) y en las secuencias estratigráficas del norte del departamento del Atlántico, podría ser posible explorar la relación entre los cambios espacio-temporales en el paleo-delta y los procesos alocíclicos con patrones progradacionales identificados en campo.

Acorde a los datos de espesor estratigráfico reportados tanto en el sector de Piojó, como en el este, en el municipio de Tubará, es claro un cambio drástico en el espesor en sentido E-W (Bordine, 1974). Mientras que en las secciones Arroyo Saco y Arroyo Piojó se registran al menos 300 metros estratigráficos de rocas del Plioceno inferior y medio, en la sección Arroyo Piedras se reportan aproximadamente 70 metros estratigráficos de rocas pliocénicas, infrayaciendo en una discordancia angular a depósitos de coquinas y areniscas calcáreas (Galeano, 2020). Los cambios tanto en el espesor como en los patrones estratigráficos y las relaciones de corte de las secuencias, indican un cambio en el depocentro hacia el occidente durante el Mioceno tardío y el Plioceno temprano. Por otro lado, para el Mioceno tardío se reportan ambientes de plataforma en la sección Arroyo Saco (Bordine, 1974; Bürgel et al., 1955), y de prodelta en la sección Cerro del Furú. En el suroriente Molinares et al (2012) interpretan ambientes de planicie deltaica para este mismo periodo. Teniendo en cuenta los datos discutidos se puede sugerir que la migración del depocentro es

causada directamente por una migración del paleo-delta en esa misma dirección durante el Plioceno temprano en una fase progradacional, aumentando la depositación de sedimentos en el sector de Galerazamba e induciendo la erosión o no depositación de sedimentos siliciclásticos en el sector de Tubará, explicando el patrón estratigráfico retrogradacional encontrado en la sección Arroyo Piedras. Aunque trabajos bioestratigráficos están en desarrollo, esta interpretación concuerda con los resultados de Bordine (1974) y Carvajal (1990), y con los ambientes interpretados por Bermúdez et al (2017).

10 Conclusiones

A partir de relaciones de campo y cartografía geológica se midieron 448 metros estratigráficos y se reconoció el orden estratigráfico de las secciones medidas, ubicando las secciones del Cerro del Furú y Playa Someca por debajo estratigráficamente de la sección del Arroyo Piojó.

La recopilación de datos bioestratigráficos de foraminíferos planctónicos reportados en el norte del departamento del Atlántico (Molinares et al., 2012; Bordine, 1974) y datos cartográficos (Galeano, 2020) permitió ubicar las secciones Cerro del Furú, y Playa Someca en el Mioceno tardío, y la sección Arroyo Piojó en el Plioceno temprano.

Debido al contraste de los patrones estratigráficos, transgresivos en Arroyo Piedras (Molinares et al., 2012), y cíclicos en Arroyo Piojó, las diferencias de espesor entre ambas secciones, y el aporte netamente siliciclástico de la sección Arroyo Piojó, se reconoció que no existe evidencia estratigráfica de patrones retrogradacionales en el sector norte del departamento del Atlántico. Sin embargo, con las observaciones realizadas no se puede descartar la influencia de uno o varios procesos alocíclicos en la evolución del paleo-delta.

A partir de cambios en los ambientes de depositación de las secuencias sedimentarias del norte del departamento del Atlántico, se infirió un cambio de posición del depocentro hacia el occidente del sector de Tubará posiblemente relacionado una migración del delta en una fase progradacional, lo cual concuerda con los resultados previos de (Bordine, 1974) y Carvajal (1990).

11 Referencias

- Aguilera, R. (2011). Sinú-San Jacinto basins, geology and hydrocarbon potential. In Cediell, F (Ed), Petroleum Geology of Colombia (1ed., pp. 1092-1264). Medellín, Colombia: ANH.
- Anderson, F. M. (1926). Original source of oil in Colombia. *AAPG Bulletin*, 10(4), 382-404.
- Anderson, F. M. (1929). Marine Miocene and related deposits of North Colombia. *Proc Calif. Ac. Sc*, 4(18), 73-213.
- Anderson, V. J., Horton, B. K., Saylor, J. E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D. O., y Ketcham, R. A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco, and Amazon river systems. *Geosphere*, 12(4), 1235-1256.
- Barrera-Olmos, R., (2001). Geología de Las Planchas 16-17 Galerazamba Y Barranquilla. *INGEOMINAS*, Bogotá. 1-49.
- Bermúdez, H. (2016). Esquema estratigráfico de secuencias del registro sedimentario del cinturón Plegado de San Jacinto, Caribe colombiano. XII Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas: Abstracts, septiembre 26-28, 2016, Bogotá.
- Bermúdez, H. D., Vega-Sandoval, F. A., y Vega, F. J. (2017). Neogene decapod crustaceans from the Caribbean of Colombia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(3), 655-668.

*Cambios en los ambientes de deposición
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

- Bhattacharya, J. (1992). Deltas. In Walker, R. G., James, N.P (Eds) Facies Models, response to sea level change (1ed., pp. 239-263). St. John's, Newfoundland: Association géologique du Canada.
- Bhattacharya, J. (2010). Deltas. In James, N.P., y Dalrymple, R (Eds), Facies models 4 (1ed., pp. 295-322). St. John's, Newfoundland: Association géologique du Canada.
- Blow, W. H. (1969). Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. *Proceedings of the first international conference on planktonic microfossils*, 1, 199-422.
- Bold, W. V. D. (1966). Upper Miocene Ostracoda from the Tubará Formation (Northern Colombia). *Micropaleontology*, 12(3), 360-364.
- Bolli, H. M., Saunders, J. B. (1989). Oligocene to Holocene low latitude planktonic foraminifera. In Bolli, H. M., Saunders, J. B., y Perch-Nielsen, K (Eds), Plankton Stratigraphy, Calcareous Nannofossils and Calpionellids (1ed., pp. 155-262). New York: Cambridge University Press.
- Bordine, B. (1974). Neogene Biostratigraphy and Paleoenvironments, Lower Magdalena Basin, Colombia. LSU Historical Dissertations and Theses. 2592.
- Boyd, R. (2010). Transgressive Wave-Dominated Coast. In James, N.P., y Dalrymple, R (Eds), Facies models 4 (1ed., pp. 295-322). St. John's, Newfoundland: Association géologique du Canada.
- Bueno, R. (1970). A Guidebook to the geology of the Tubará Region, Lower Magdalena Basin. In Eleventh Field Conference, 299-324.

- Bürgl, H., Barrios, M., y Röström, A. M. (1955). Micropaleontología y estratigrafía de una sección Arroyo Saco, Depto. del Atlántico. *Boletín Geológico*, 3(1), 1-114.
- Canale, N., Ponce, J. J., Carmona, N. B., Drittanti, D. I., Olivera, D. E., Martínez, M. A., y Bournod, C. N. (2015). Sedimentología e Icnología de deltas fluvio-dominados afectados por descargas hiperpícnicas de la Formación Lajas (Jurásico Medio), Cuenca Neuquina, Argentina. *Andean Geology*, 42(1), 114-138.
- Cardona, A., Montes, C., Ayala, C., Bustamante, C., Hoyos, N., Montenegro, O., ... y Rincón, D. (2012). From arc-continent collision to continuous convergence, clues from Paleogene conglomerates along the southern Caribbean–South America plate boundary. *Tectonophysics*, 580, 58-87.
- Carvajal, J. H. (1990). Características sedimentológicas de la plataforma continental frente a Galerazamba. Mem. VII Semin. Nac. Cienc. Tecnol. Mar, CCO, Cali, 164-175.
- Clifton, H. E. (2007). A reexamination of facies models for clastic shorelines. *Facies models revisited*, 293-337.
- Dalrymple, R. (2010). Interpreting Sedimentary Successions: Facies, Facies Analysis and Facies Models. In James, N.P., y Dalrymple, R (Eds), *Facies models 4* (1ed., pp. 295-322). St. John's, Newfoundland: Association géologique du Canada.
- De Porta, J. (1974). Lexique Stratigraphique International. Amérique Latine. Fasc. 4: *Centre National de la Recherche Scientifique*, 5, 692 pp
- De Porta, J. (2003). La formación del istmo de Panamá. Su incidencia en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 27(103), 191-216.

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

- Dumas, S., y Arnott, R. W. C. (2006). Origin of hummocky and swaley cross-stratification-The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. *Geology*, 34(12), 1073-1076.
- Duque-Caro, H. (1979). Major Structural Elements and Evolution of Northwestern Colombia: Small Basin Margins. In Watkins, J., Montadert, J., y P. Wood Dickerson (Eds.), *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins* (1ed., pp. 329-531). AAPG Memoir 29, Tulsa.
- Duque-Caro, H. (1984). Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland. *Geol. Soc. Am. Mem*, 162, 303-316.
- Eberli, G. P. (2000). The record of Neogene sea-level changes in the prograding carbonates along the Bahamas transect-leg 166 synthesis. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific results*, 166(1), 167-216.
- Flinch, J. F. (2003). Structural evolution of the Sinú-Lower Magdalena area (Northern Colombia) in Bartolini, C., Buffler, R., y Blickwede, J (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (1., pp. 776-796). AAPG Memoir 79.
- Galeano, J.J. (2020). *Cartografía geológica de las unidades Neógenas del noreste del cinturón plegado de San Jacinto*, Colombia. Artículo en preparación.
- Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, A. y Diedrix, H., compiladores. (2015). Mapa geológico de Colombia. Escala 1:1000000. *Servicio Geológico Colombiano*.

- Guzmán, G., Gómez, E., y Serrano, B. (2004). Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena-Caribe Colombiano. *INGEOMINAS*, Bogotá. 1-134.
- Huguett, A. (1988). Resumen de la hidrogeología de los departamentos de Atlántico y Bolívar al norte del Canal del Dique. *Boletín Geológico*, 29(1), 85-172.
- Idárraga-García, J., Masson, D. G., García, J., León, H., y Vargas, C. A. (2019). Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean). *Marine Geology*, 414, 18-33.
- Ielpi, A., Fralick, P., Ventra, D., Ghinassi, M., Lebeau, L. E., Marconato, A., ... y Rainbird, R. H. (2018). Fluvial floodplains prior to greening of the continents: Stratigraphic record, geodynamic setting, and modern analogues. *Sedimentary Geology*, 372, 140-172.
- Kolla, V., Buffer, R. T., y Ladd, J. W. (1984). Seismic stratigraphy and sedimentation of Magdalena fan, southern Colombian basin, Caribbean Sea. *AAPG bulletin*, 68(3), 316-332.
- León, S., Cardona, A., Parra, M., Sobel, E. R., Jaramillo, J. S., Glodny, J., ... y Monsalve, G. (2018). Transition from collisional to subduction-related regimes: An example from Neogene Panama-Nazca-South America interactions. *Tectonics*, 37(1), 119-139.
- Link, T. A. (1927). Post-Tertiary strand-line oscillations in the Caribbean coastal area of Colombia, South America. *The Journal of Geology*, 35(1), 58-72.
- Mantilla-Pimiento, A. M., Jentzsch, G., Kley, J., y Alfonso-Pava, C. (2009). Configuration of the Colombian Caribbean margin: Constraints from 2D seismic reflection data and potential fields interpretation. In Lallemand, S., y Funiciello, F (Eds), Subduction zone geodynamics (1ed., pp. 247-272). Springer, Berlin, Heidelberg.

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

- Martini, I., y Sandrelli, F. (2015). Facies analysis of a Pliocene river-dominated deltaic succession (Siena Basin, Italy): Implications for the formation and infilling of terminal distributary channels. *Sedimentology*, 62(1), 234-265.
- Molinares Blanco, C. E. (2007). Reconstrucción paleoambiental y asociaciones de foraminíferos de la formación Tubará (Plioceno temprano), sección Arroyo Piedras (norte de Colombia) (Master's thesis, Universidad EAFIT., Medellín, Colombia). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10784/230>
- Molinares, C. E., Martínez, J. I., Fiorini, F., Escobar, J., y Jaramillo, C. (2012). Paleoenvironmental reconstruction for the lower Pliocene Arroyo Piedras section (Tubará-Colombia): Implications for the Magdalena River-paleodelta's Dynamic. *Journal of South American Earth Sciences*, 39(1), 170-183.
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J. C., Valencia, V., ... y Niño, H. (2015). Middle Miocene closure of the Central American seaway. *Science*, 348(6231), 226-229.
- Montes, C., Rodríguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., y Cardona, A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198(1), 1-19.
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez-Mejía, M., Faccenna, C., Veloza, G., ... y Mesa, A. (2017). Linking Late Cretaceous to Eocene tectonostratigraphy of the San Jacinto fold belt of NW Colombia with Caribbean Plateau collision and flat subduction. *Tectonics*, 36(11), 2599-2629.
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Mora, A., Veloza, G., Vélez, V., y de Freitas, M. (2018). Controls on forearc basin formation and evolution: Insights from Oligocene to Recent

- tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena Valley basin of northwest Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 97(1), 288-310.
- Morsilli, M., y Pomar, L. (2012). Internal waves vs. surface storm waves: a review on the origin of hummocky cross-stratification. *Terra Nova*, 24(4), 273-282.
- O'Dea, A., Lessios, H. A., Coates, A. G., Eytan, R. I., Restrepo-Moreno, S. A., Cione, A. L., y Stallard, R. F. (2016). Formation of the Isthmus of Panama. *Science advances*, 2(8), e1600883.
- Ortiz, J. R., y Jaramillo, C. A. (2018). SDAR: A Toolkit for Stratigraphic Data Analysis in R.
- Osorio-Granada, E., Pardo-Trujillo, A., Restrepo-Moreno, S. A., Gallego, F., Muñoz, J., Plata, A., ... y Foster, D. A. (2020). Provenance of Eocene–Oligocene sediments in the San Jacinto Fold Belt: Paleogeographic and geodynamic implications for the northern Andes and the southern Caribbean. *Geosphere*, 16(1), 210-228.
- Payros, A., Astibia, H., Cearreta, A., Pereda-Suberbiola, X., Murelaga, X., y Badiola, A. (2000). The Upper Eocene South Pyrenean Coastal deposits (Liedena sandstone, Navarre): Sedimentary facies, benthic foraminifera and avian ichnology. *Facies*, 42(1), 107-131.
- Pérez-Ángel, L. C., y Molnar, P. (2017). Sea surface temperatures in the Eastern Equatorial Pacific and surface temperatures in the Eastern Cordillera of Colombia during El Niño: Implications for Pliocene conditions. *Paleoceanography*, 32(11), 1309-1314.
- Pickering, K., y Hiscott, R. (2016). Deep Marine Systems: Processes, Deposits, Environments, Tectonic and Sedimentation., Oxford, England: John Wiley y Sons.

*Cambios en los ambientes de depositación
de las unidades neógenas del sector de Piojó, Atlántico, Colombia.*

- Raasveldt, H. C. (1953). Algunas anotaciones al croquis fotogeológico del departamento del Atlántico. *Serv. Geol. Nal.* Informe no. 936. Bogotá.
- Reading, H. G., y Collinson, J. D. (1996). Clastic coasts. In Reading, H. G (Ed), *Sedimentary environments* (3ed., pp. 154-231). Oxford, UK: Blackwell.
- Redmond, C. D. (1953). Miocene Foraminifera from the Tubará beds of northern Colombia. *Journal of Paleontology*, 27(5), 708-733.
- Restrepo, J. D., y Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of hydrology*, 235(1-2), 137-149.
- Reyes, G, y Zapata, G. (2001). Geología de la plancha 24 Sabanalarga. *INGEOMINAS*, Bogotá. 19-50.
- Sarkar, S., y Koner, A. (2020). Ancient rip current records and their implications: an example from the Cretaceous Ukra Member, Kutch, India. *Journal of Palaeogeography*, 9(1), 1-17.
- Scasso, R. A., Aberhan, M., Ruiz, L., Weidemeyer, S., Medina, F. A., y Kiessling, W. (2012). Integrated bio-and lithofacies analysis of coarse-grained, tide-dominated deltaic environments across the Cretaceous/Paleogene boundary in Patagonia, Argentina. *Cretaceous Research*, 36, 37-57.
- Shanley, K. W., McCABE, P. J., y Hettinger, R. D. (1992). Tidal influence in Cretaceous fluvial strata from Utah, USA: a key to sequence stratigraphic interpretation. *Sedimentology*, 39(5), 905-930.

- Siravo, G., Fellin, M. G., Faccenna, C., y Maden, C. (2020). Transpression and the build-up of the Cordillera: the example of the Bucaramanga fault (Eastern Cordillera, Colombia). *Journal of the Geological Society*, 177(1), 14-30.
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., y Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202(2-4), 335-349.
- Walker, R. G. (1992). Turbidites and submarine fans. In Walker, R. G., James, N.P (Eds) *Facies Models, response to sea level change* (1ed., pp. 239-263). St. John's, Newfoundland: Association géologique du Canada.
- Wagner, L. S., Jaramillo, J. S., Ramírez-Hoyos, L. F., Monsalve, G., Cardona, A., y Becker, T. W. (2017). Transient slab flattening beneath Colombia. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6616-6623.
- Wara, M. W., Ravelo, A. C., y Delaney, M. L. (2005). Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science*, 309(5735), 758-761.